

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

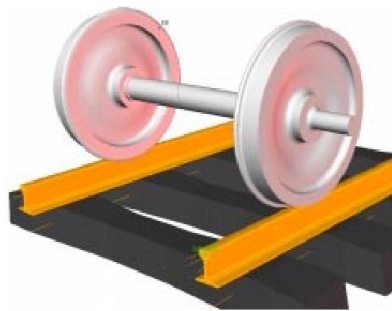
### **1.1 Latar Belakang**

Salah satu faktor yang mempengaruhi umur pakai sebuah mesin adalah adanya gesekan satu sama lain yang terjadi bila komponen-komponen dalam permesinan saling kontak, sehingga menimbulkan adanya pengikisan permukaan komponen. Pengikisan atau dalam kata lain kita sebut sebagai keausan. Keausan inilah yang menjadi salah satu faktor utama terhadap umur dari komponen-komponen dalam permesinan.

Keausan ini terjadi akibat kontak antara satu sama lain yang dapat berupa kontak statis (*static contact*) maupun kontak mekanis seperti *rolling contact*, *sliding contact*, atau *rolling-sliding contact*. Dalam skala kecil kita dapat mengetahui bahwa *asperity* terdeformasi selama terjadi kontak ketika dua permukaan benda ditekan bersamaan. Dalam skala besar, informasi ini mungkin berguna dalam menganalisa gesekan (*friction*), keausan (*wear*), pelumasan (*lubrication*), dan sebagainya.

Ilmu mekanika kontak (*contact mechanics*) merupakan bagian dari ilmu tribologi yang membahas mengenai deformasi dan tegangan dua benda yang bersinggungan satu sama lain. Kontak yang terjadi antara dua benda dapat berupa titik (*point*), garis (*line*) ataupun permukaan (*surface*). Jika kontak yang terjadi diteruskan dengan dikenai suatu beban kontak, maka kontak yang awalnya berupa suatu titik dapat berubah menjadi bentuk ataupun permukaan yang lain.

Fenomena ini juga dapat dikembangkan dalam ilmu mekanika kontak sehingga dapat diterapkan di industri untuk menganalisa kasus kegagalan atau kerusakan pada komponen mesin yang saling kontak. Contoh penerapan kasus kontak misalkan gesekan yang terjadi pada roda kereta api dengan rel, kemudian gesekan antara *gear* yang saling berputar dan lain sebagainya seperti yang terlihat pada Gambar 1.1.



(a)

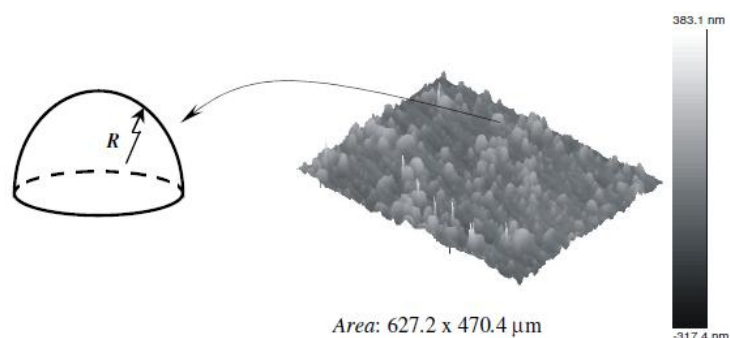


(b)

**Gambar 1.1.** Contoh komponen-komponen mekanikal yang saling kontak (a) roda kereta api dengan rel, (b) gesekan dua buah *gear* [1].

Setelah kita telah mengetahui faktor-faktor tersebut, maka akan kita dapatkan kesimpulan, bahwa untuk membuat komponen-komponen mekanikal maka salah satu hal yang harus kita perhatikan adalah tentang adanya faktor keausan. Keausan akan tetap terjadi pada mesin yang saling kontak, dan kita tidak dapat menghilangkan faktor keausan tersebut. Kita hanya dapat mengurangi keausan dengan jalan setelah kita mempelajari sifat dari keausan tersebut.

Jika kita lihat permukaan sebenarnya dengan perbesaran sampai dengan skala nanometer dari suatu permukaan komponen dalam permesinan, maka akan kita lihat permukaan yang tidaklah halus melainkan kasar. Permukaan kasar tersebut seperti pada Gambar 1.2, dapat terlihat dari permukaan kasar tersebut menyerupai bentuk gunung-gunung. Satu dari beberapa gunung tersebut kemudian dinamakan “*asperity*”.



**Gambar 1.2.** Permukaan suatu komponen dan *asperity* [2].

Pada penelitian ini diambil suatu kasus kontak yaitu *rolling-sliding*. Dalam sistem kontak *rolling-sliding*, karena adanya kontak antara dua benda yang saling berputar dan mengalami gesekan maka akan timbul keausan yang kemudian akan dilakukan pengurangan keausan tersebut dengan jalan pelumasan. Pada umumnya metode yang digunakan untuk menentukan keausan adalah dengan metode pengujian skala laboratorium, alat yang biasa digunakan adalah *Tribometer*. Salah satu *Tribometer* yang sering digunakan adalah “*twin-disc*”. Bentuk dari *twin-disc* tersebut merupakan penyederhanaan bentuk satu *asperity* dari kekasaran permukaan yang ada, namun metode pengujian ini membutuhkan biaya yang relatif tidak sedikit.

Penulis mencari atau menentukan nilai keausan pada sistem kontak *rolling-sliding* menggunakan metode lain, antara lain metode analitik dan metode elemen hingga dengan melakukan simulasi keausan memakai bantuan *software FEM (finite element method)* yaitu menggunakan *software ABAQUS 6.10-1*. Diharapkan dengan kita mengetahui metode-metode tersebut, maka kita dapat menentukan keausan suatu komponen tanpa harus melakukan pengujian skala laboratorium.

## 1.2 Tujuan penulisan

Tujuan penulisan tentang perhitungan keausan pada kasus kontak *rolling-sliding* pada *twin-disc tribometer* menggunakan metode elemen hingga ini adalah sebagai berikut:

1. Menghitung ulang metode keausan pada kasus kontak *rolling-sliding* yang digunakan pada model yang ada kemudian hasilnya diverifikasi.
2. Membandingkan hasil perhitungan keausan menggunakan *update geometry* yang berbeda.
3. Menggunakan metode yang telah diverifikasi untuk memprediksi keausan dengan beban yang berbeda.

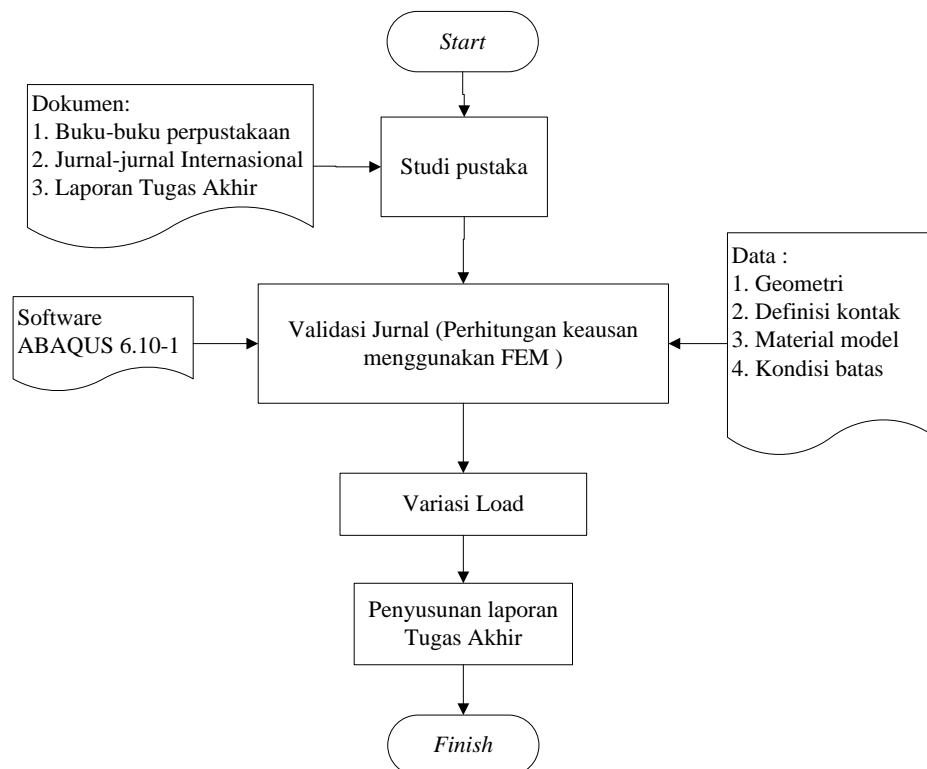
### 1.3 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang diambil pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Pemodelan *FEM* menggunakan *Software* ABAQUS 6.10-1.
2. Sifat material elastis dengan modulus elastisitas ( $E$ ) = 152 GPa, *Poisson's ratio* ( $\nu$ ) = 0.32, isotropik.
3. Kedua permukaan saling bergesekan, dengan koefisien gesek ( $\mu$ ) = 0.6.
4. Dengan *wear coefficient* ( $K_D$ ) =  $1 \times 10^{-8} \text{ MPa}^{-1}$
5. Efek panas akibat gesekan diabaikan.
6. Tidak ada pelumasan.

### 1.4 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan oleh penulis adalah :



**Gambar 1.3.** Diagram penelitian yang dikerjakan oleh penulis

Pada Gambar 1.3 Penelitian dimulai dari pembelajaran dan pembahasan terhadap hasil-hasil penelitian dan literatur-literatur yang sudah ada sebelumnya kemudian mencoba mensimulasikan kasus yang pernah dianalisa oleh peneliti untuk dijadikan data pustaka. Selanjutnya hasil simulasi dianalisa dengan teori yang ada dan membandingkannya dengan data pustaka.

*Software* ABAQUS 6.10-1 digunakan sebagai alat bantu untuk simulasi menggunakan metode elemen hingga. Penyusunan laporan Tugas Akhir dilakukan setelah mensimulasikan kembali dengan metode yang sama seperti pada saat validasi untuk memprediksi nilai keausan pada beban yang berbeda.

### **1.5 Sistematika Penulisan**

Pada Bab 1 dijelaskan tentang latar belakang masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, metode penelitian dan sistematika penulisan laporan Tugas Akhir. Pada bab berikutnya berisi tentang teori-teori keausan secara umum. Pada Bab 3 menjelaskan tentang uraian yang membahas model-model keausan dan metode-metode prediksi keausan, yaitu: model keausan Archard, model keausan Sarkar, metode prediksi keausan Podra, metode keausan Kanavalli dan metode prediksi keausan Hegadekatte.

Pada Bab 4 berisi tentang langkah-langkah perhitungan keausan menggunakan metode analitik dan metode elemen hingga. Pada Bab 5 berisi hasil dan pembahasan dari perhitungan keausan untuk verifikasi dan prediksi keausan pada beban yang berbeda. Pada Bab 6 berisi tentang kesimpulan yang diambil setelah dilakukannya analisa serta saran penulis yang diharapkan bisa memberikan masukan untuk analisis yang lebih baik di masa yang akan datang.

Terakhir adalah Daftar Pustaka menampilkan seluruh informasi dan dokumen tertulis yang dijadikan landasan dan pengembangan penelitian. Penulisan daftar pustaka mengikuti aturan "*Vancouver System*".

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA: TEORI KEAUSAN

#### 2.1 Pengertian keausan

Definisi paling umum dari keausan yang telah dikenal sekitar 50 tahun lebih yaitu hilangnya bahan dari suatu permukaan atau perpindahan bahan dari permukaannya ke bagian yang lain atau Bergeraknya bahan pada suatu permukaan [3]. Definisi lain tentang keausan yaitu sebagai hilangnya bagian dari permukaan yang saling berinteraksi yang terjadi sebagai hasil gerak relatif pada permukaan [4].

Kausan yang terjadi pada suatu material disebabkan oleh adanya beberapa mekanisme yang berbeda dan terbentuk oleh beberapa parameter yang bervariasi meliputi bahan, lingkungan, kondisi operasi, dan geometri permukaan benda yang terjadi keausan.

#### 2.2 Jenis-jenis keausan dan penyebabnya

Mekanisme keausan dikelompokkan menjadi dua kelompok, yaitu keausan yang penyebabnya didominasi oleh perilaku mekanis dari bahan dan keausan yang penyebabnya didominasi oleh perilaku kimia dari bahan [5], sedangkan menurut Koji Kato, tipe keausan terdiri dari tiga macam, yaitu *mechanical, chemical and thermal wear* [6].

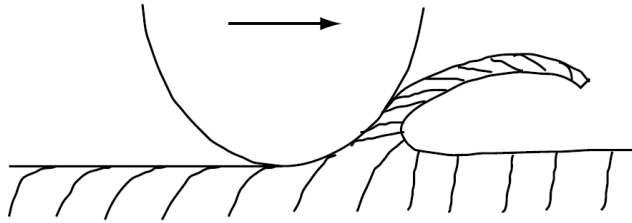
##### 2.2.1 Keausan yang disebabkan perilaku mekanis (*mechanical*)

Digolongkan lagi menjadi *abrasive, adhesive, flow and fatigue wear*.

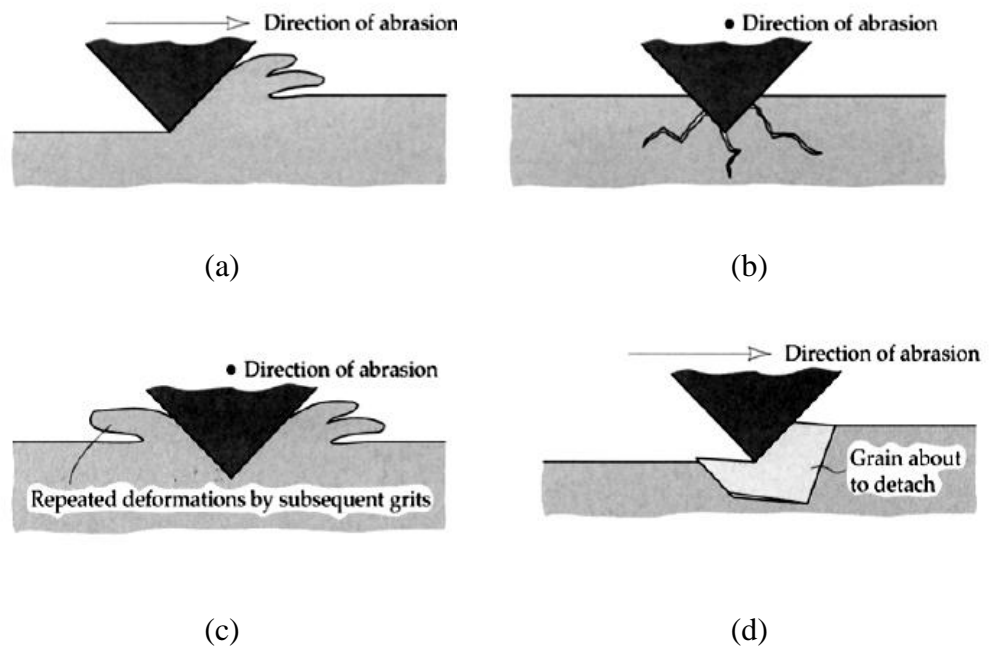
###### 1. *Abrasive wear*.

Kausan ini terjadi jika partikel keras atau permukaan keras yang kasar menggerus dan memotong permukaan sehingga mengakibatkan hilangnya material yang ada di permukaan tersebut (*earth moving equipment*) [5, 6].

Contoh : *micro-cutting, wedge forming, dan ploughing*.



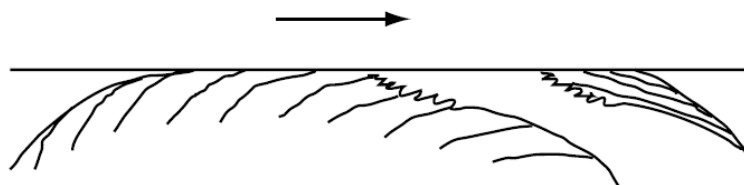
**Gambar 2.1.** Abrasive wear oleh *microcutting* pada permukaan yang lunak.



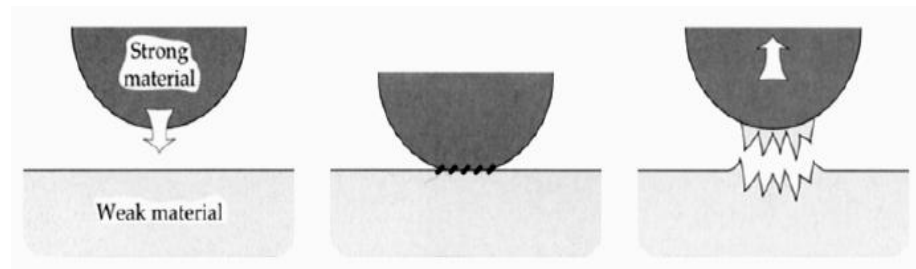
**Gambar 2.2.** Mekanisme pada *abrasive wear* a) *cutting*, b) *fracture*, c) *fatigue by repeating ploughing* dan d) *grain pull-out* [5, 6].

## 2. Adhesive wear.

Keausan ini terjadi jika partikel permukaan yang lebih lunak menempel atau melekat pada lawan kontak yang lebih keras.



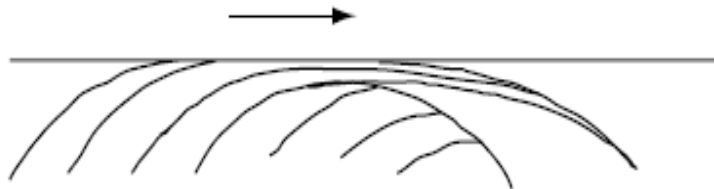
**Gambar 2.3.** Adhesive wear karena *adhesive shear* dan *transfer* [7].



**Gambar 2.4.** Proses perpindahan logam karena *adhesive wear* [5, 6].

### 3. *Flow wear*.

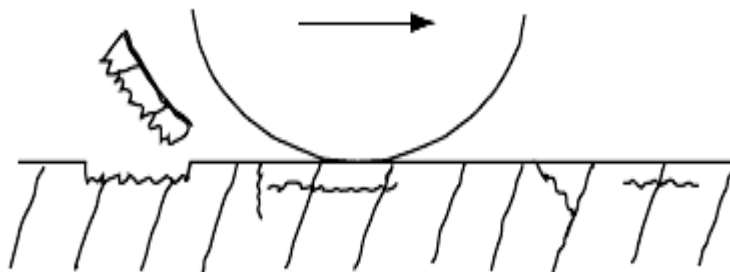
Keausan ini terjadi jika partikel permukaan yang lebih lunak mengalir seperti meleleh dan tergeser plastis akibat kontak dengan lain, seperti Gambar 2.5.



**Gambar 2.5.** *Flow wear* oleh penumpukan aliran geseran plastis [7].

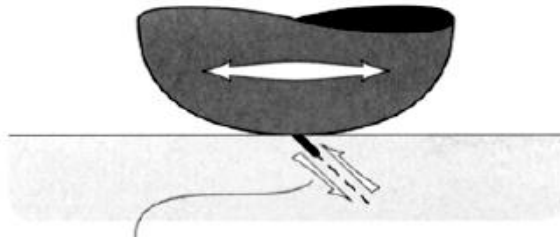
### 4. *Fatigue wear*.

Fenomena keausan ini didominasi akibat kondisi beban yang berulang (*cyclic loading*). Ciri-cirinya perambatan retak lelah biasanya tegak lurus pada permukaan tanpa deformasi plastis yang besar, seperti: *ball bearings*, *roller bearings* dan lain sebagainya seperti pada Gambar 2.6.

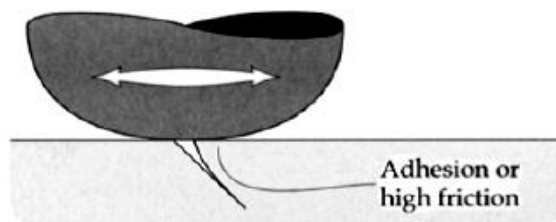


**Gambar 2.6.** *Fatigue wear* karena retak di bagian dalam dan merambat [7].

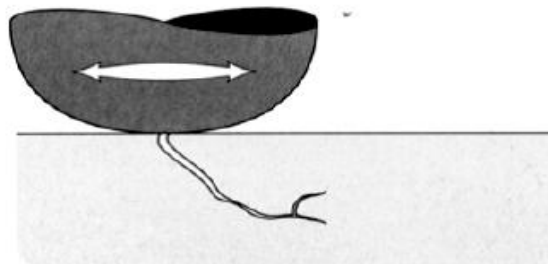




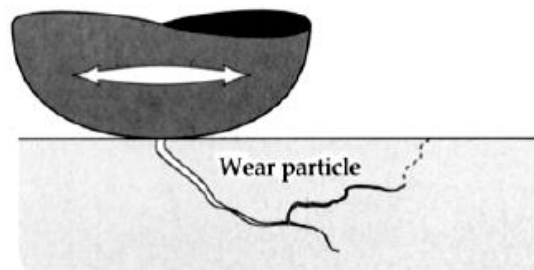
- a. Permulaan retak sebagai hasil dari proses fatik.



- b. Retak primer merambat sepanjang bidang *slip*.

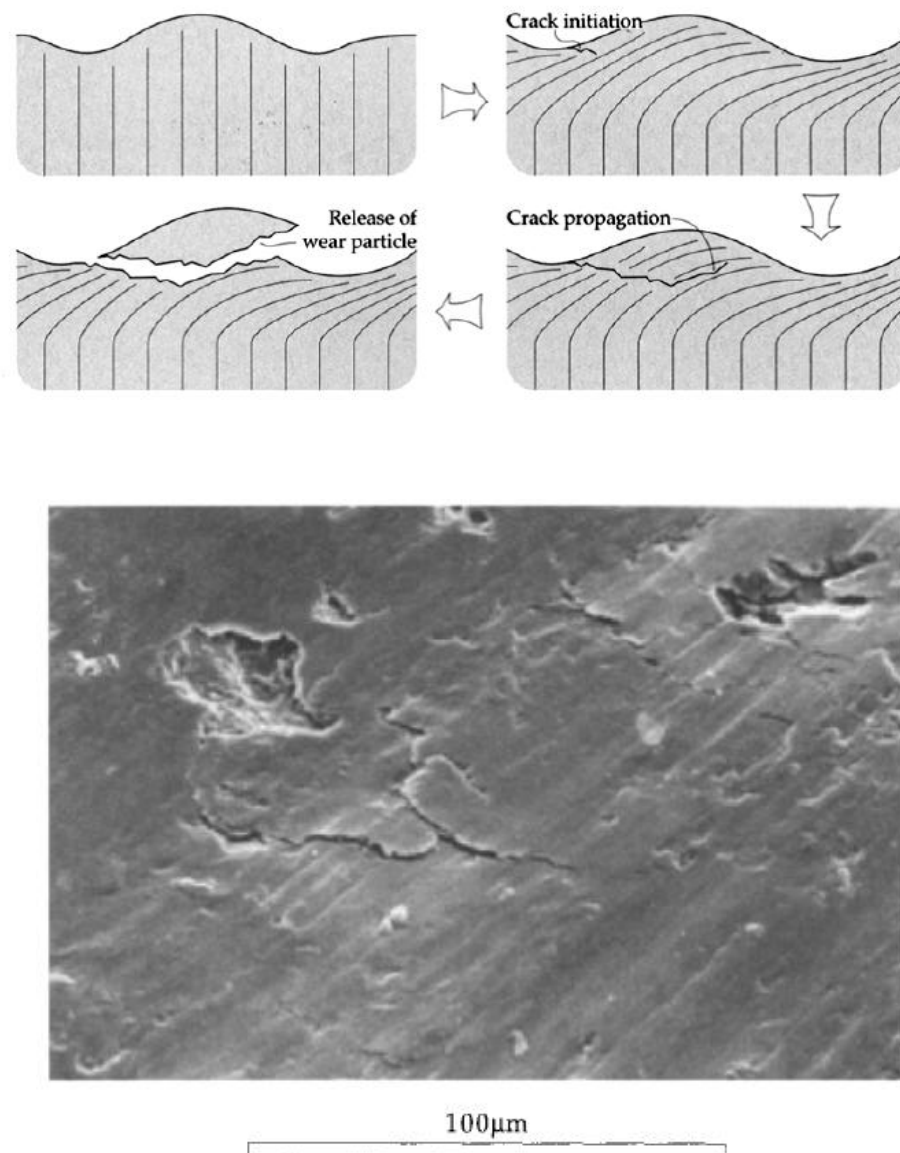


- c. Retak tambahan dari permulaan retak.



- d. Tambahan retak merambat dan terbentuklah partikel keausan.

**Gambar 2.7.** Skema penggambaran proses retak dari awal retak dan merambatnya retak permukaan [8].



**Gambar 2.8.** Contoh terbentuknya partikel keausan pada aus lelah [9].

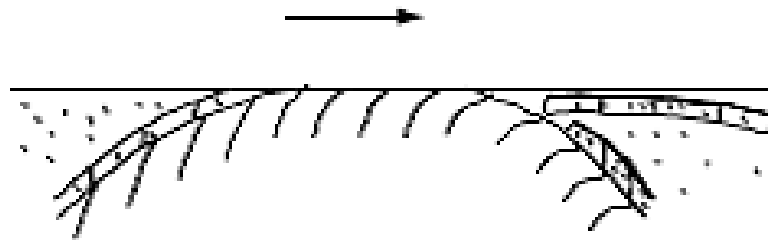
### 2.2.2 Keausan yang disebabkan perilaku kimia

#### 1. *Oxidative wear.*

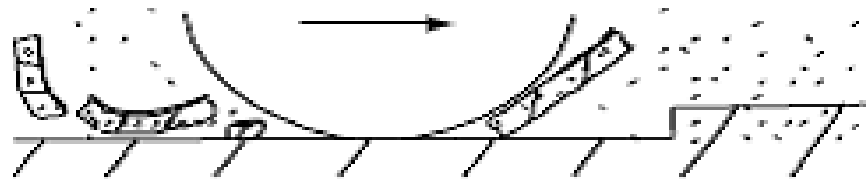
Pada peningkatan kecepatan *sliding* dan beban rendah, lapisan oksida tipis, tidak lengkap, dan rapuh terbentuk. Pada percepatan yang jauh lebih tinggi, lapisan oksida menjadi berkelanjutan dan lebih tebal, mencakup seluruh permukaan. Contoh: Permukaan luncur di dalam lingkungan yang oksidatif.

## 2. *Corrosive wear*.

Mekanisme ini ditandai oleh batas butir yang korosif dan pembentukan lubang. Misalnya, permukaan *sliding* di dalam lingkungan yang korosif.



**Gambar 2.9.** *Corrosive wear* karena patah geser pada lapisan lentur [7].



**Gambar 2.10.** *Corrosive wear* karena pengelupasan yang terjadi pada lapisan yang rapuh [7].

### 2.2.3 Keausan yang disebabkan perilaku panas (*Thermal Wear*)

#### 1. *Melt wear*.

Keausan yang terjadi karena panas yang muncul akibat gesekan benda sehingga permukaan aus meleleh.

#### 2. *Diffusive wear*.

Terjadi ketika ada pancaran (*diffusion*) elemen yang melintasi bidang kontak misalnya pada perkakas baja kecepatan tinggi.

Dalam banyak situasi keausan, ada banyak mekanisme yang beroperasi secara serempak, akan tetapi biasanya akan ada satu mekanisme penentu tingkat keausan yang harus diteliti dalam hal ini berhubungan dengan masalah keausan. Hubungan antara

koefisien gesek dan laju keausan belum ada penjelasan yang tepat, karena hubungan keduanya akan selalu berubah terhadap waktu [10]. Saat ini yang paling banyak digunakan dan paling sederhana dalam memodelkan keausan adalah model keausan Archard, beberapa yang lain mencoba mengembangkan model keausan dengan memasukkan efek gesekan dalam menawarkan model yang lebih akurat yang dibandingkan dengan penelitian percobaan yang telah dibuat [11].

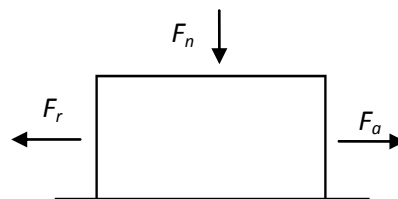
### 2.3 Teori *sliding*, *rolling* dan *rolling-sliding contact*.

Keausan pada suatu benda dapat terjadi ketika benda tersebut mengalami kontak diantara dua permukaan, diantaranya dapat karena benda tersebut mengalami peristiwa *sliding contact*, *rolling contact* atau mengalami dua peristiwa yang bersamaan yaitu *rolling sliding contact*.

#### 2.3.1 Teori *sliding contact*.

Gesekan biasanya terjadi di antara dua permukaan benda yang bersentuhan, baik terhadap udara, air atau benda padat. Ketika sebuah benda bergerak di udara, permukaan benda tersebut akan bersentuhan dengan udara sehingga terjadi gesekan antara benda tersebut dengan udara. Demikian juga ketika bergerak di dalam air. Gaya gesekan juga selalu terjadi antara permukaan benda padat yang bersentuhan, sekalipun benda tersebut sangat licin. Permukaan benda yang sangat licin pun sebenarnya sangat kasar dalam skala mikroskopis (*asperity*).

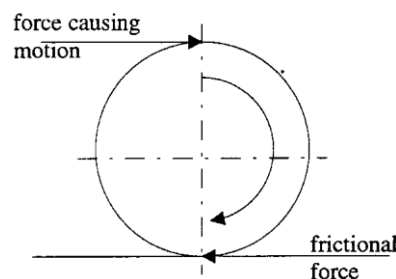
Jika permukaan suatu benda bergeseran dengan permukaan benda lain, masing-masing benda tersebut melakukan gaya gesekan antara satu dengan yang lain. Gaya gesekan pada benda yang bergerak selalu berlawanan arah dengan arah gerakan benda tersebut. Selain menghambat gerak benda, gesekan dapat menimbulkan aus dan kerusakan.



**Gambar 2.11.** *Sliding contact* [12].

### 2.3.2 Teori *rolling contact*

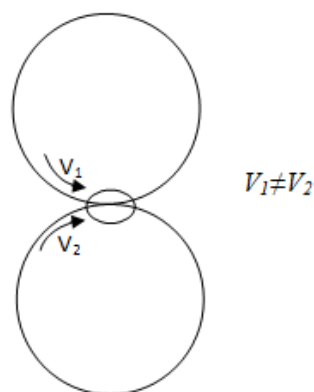
*Rolling* adalah perbedaan kecepatan sudut (*angular*) relatif antara dua benda terhadap suatu *axis* yang berada dalam suatu bidang tangensial [4,18]. Yaitu fenomena terjadinya perpindahan (*displacement*) secara rotasi pada suatu titik, yang diakibatkan adanya perbedaan  $\omega$ . Pada problem 2-D untuk dua buah silinder, kontak yang terjadi berjenis *line contact*. *Rolling contact* sesungguhnya hanya dapat terjadi jika terdapat gesekan, sehingga gaya tangensial yang dipindahkan akan selalu lebih kecil dari gaya normal. Jika gesekan dihilangkan, maka hanya terjadi perubahan sudut tanpa diikuti perpindahan.



Gambar 2.12. *Rolling contact* [13].

### 2.3.3 Teori *rolling-sliding contact*

*Rolling contact* dapat diartikan adanya kontak antara dua buah benda dimana benda mengalami rotasi dan adanya pembebanan untuk benda tersebut sehingga terjadinya kontak. ketika dua buah benda tersebut mengalami rotasi yang sama dapat dikatakan bahwa benda tersebut mengalami *rolling* sempurna. Namun dalam kenyataannya kondisi *rolling* sempurna sangat sulit ditemui.



Gambar 2.12. *Rolling sliding contact* [14].

Ketika benda tersebut berputar, sedemikian sehingga titik kontak bergerak ke permukaan benda, kemudian ada dua berbagai kemungkinan dimana kecepatan  $V_1$  dari titik-kontak pada permukaan benda satu sama dengan kecepatan  $V_2$  dari titik-kontak di atas permukaan benda dua, atau tidak. Dalam kasus ini (kecepatan yang sama) orang menyebutnya *rolling*, kemudian kasus tentang dorongan dinamakan *sliding*, atau *rolling* dengan *sliding*.

### BAB III

#### MODEL - MODEL KEAUSAN

##### 3.1 Model keausan Archard [15]

Archard 1953 mengusulkan suatu model pendekatan untuk mendeskripsikan keausan *sliding*. Dia berasumsi bahwa parameter kritis dalam keausan *sliding* adalah medan tegangan di dalam kontak dan jarak *sliding* yang relatif antara permukaan kontak. Model ini sering dikenal sebagai hukum keausan Archard (*Archard's wear law*). Sebenarnya bentuk dasarnya pertama kali diterbitkan oleh Holm [16].

Model didasarkan pada pengamatan-pengamatan bersifat percobaan. Bentuk sederhana dari model keausan ini adalah:

$$\frac{V}{s} = k \frac{F_N}{H}$$

$$V = k_D \cdot F_N \cdot s \quad (3.1)$$

dimana  $V$  adalah volume material yang hilang akibat keausan,  $s$  adalah jarak *sliding*,  $F_N$  adalah beban normal,  $H$  adalah kekerasan dari material yang mengalami keausan,  $k$  adalah koefisien keausan tak berdimensi,  $k_D$  adalah koefisien keausan yang berdimensi. Koefisien keausan  $k$ , merupakan suatu konstanta yang disediakan untuk mencocokkan perhitungan antara teori dan pengujian.

Untuk aplikasi *engineering*, ketinggian keausan memiliki lebih banyak keuntungan, dibanding volume keausan. Maka Archard membagi kedua sisi dari persamaan (3.1) dengan daerah kontak yang terbentuk  $A$ , sehingga persamaan menjadi

$$\frac{h^w}{s} = k_D \cdot p \quad (3.2)$$

dimana  $h^w$  adalah tinggi keausan, dan  $p$  adalah tekanan kontak (*contact pressure*).

Proses keausan dapat dianggap sebagai suatu proses dinamik dan prediksi dari proses ini dapat dilihat sebagai sebuah permasalahan nilai awal. Model keausan kemudian bisa digambarkan sebagai suatu persamaan diferensial untuk keausan linier.

$$\frac{dh^w}{ds} = k_D \cdot p \quad (3.3)$$

### 3.2 Model keausan Sarkar [17]

Pada tahun 1980, Sarkar memodifikasi model keausan Archard dengan pertimbangan adanya suatu koefisien gesek antara permukaan yang saling bergesekan. Seperti yang didiskusikan sebelumnya, hubungan antara koefisien gesek dan tingkat keausan lebih kompleks. Meskipun begitu, Sarkar telah memodifikasi suatu model keausan yang menghubungkan antara koefisien gesek dengan volume yang hilang dari bahan. Model keausan ini adalah pengembangan model keausan Archard, sehingga menjadi:

$$\frac{V}{s} = k \cdot \frac{F_N}{H} \cdot \sqrt{1 + 3\mu^2} \quad (3.4)$$

dimana  $\mu$  adalah koefisien gesek,  $V$  adalah volume material yang hilang akibat keausan,  $s$  adalah jarak *sliding*,  $F_N$  adalah beban normal,  $H$  adalah kekerasan dari material yang mengalami keausan,  $k$  adalah koefisien keausan tak berdimensi.

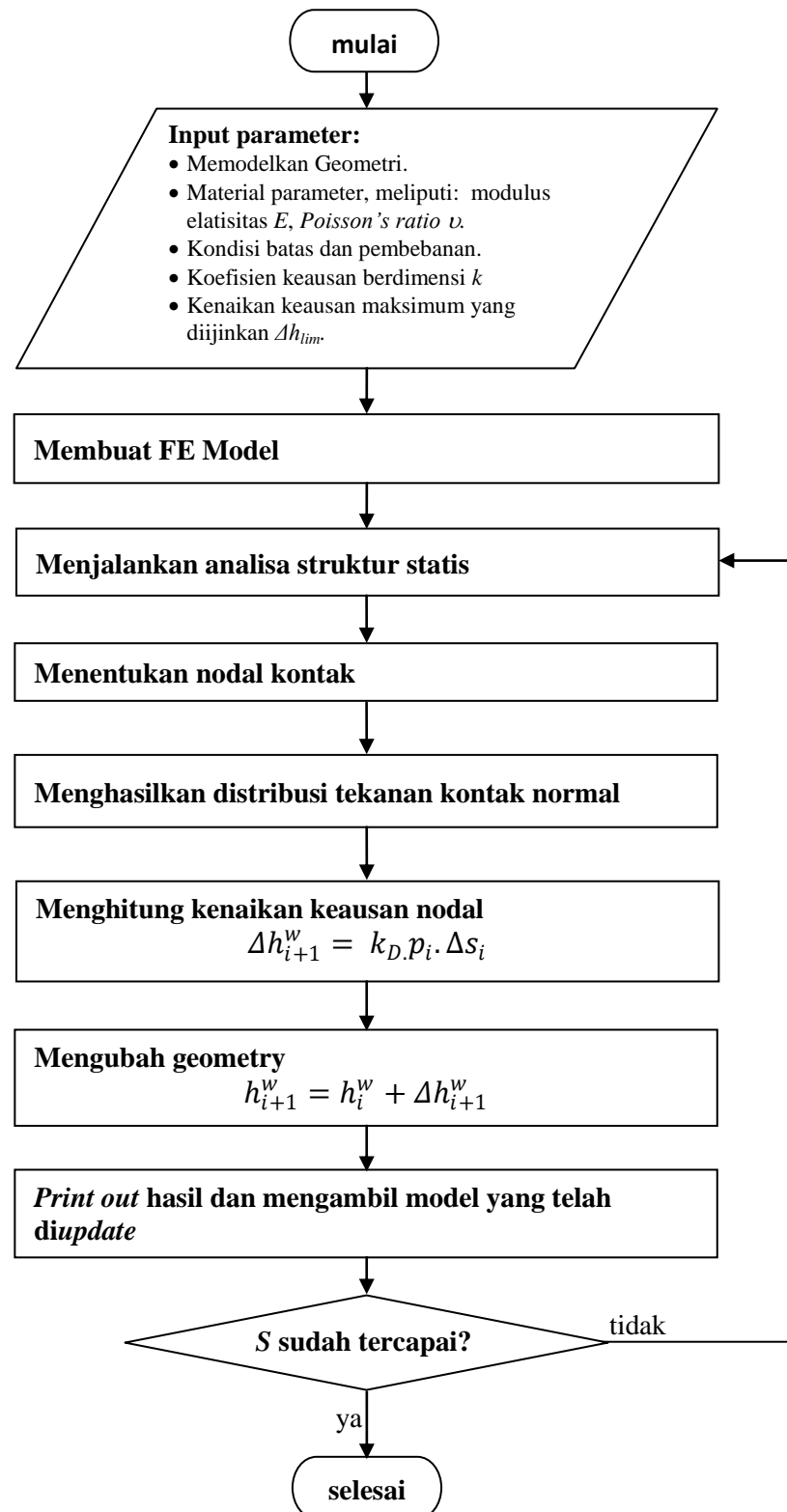
### 3.3 Metode prediksi keausan Podra [18]

Podra telah melakukan suatu perhitungan keausan dengan cara membandingkan antara hasil pengujian dengan simulasi menggunakan *Finite Element Method (FEM)*. Tugas utama dari *FEM* adalah untuk menghitung tekanan kontak (*contact pressure*). Perhitungan keausan memakai *FEM* melibatkan penyelesaian masalah kontak secara umum antara benda yang saling kontak dengan menggunakan model dua dimensi (2D).

Diagram alir dari prosedur simulasi keausan memakai *FEM* ditunjukkan dalam Gambar 3.1. Diagram tersebut terdiri dari suatu rangkaian langkah-langkah solusi secara struktural yang dikombinasikan dengan perhitungan-perhitungan tambahan. Jadi pekerjaan perhitungan keausan melibatkan dua hal, yaitu mencari nilai (*contact pressure*),  $p$ , kemudian nilai tersebut dimasukkan ke dalam persamaan (3.2) sebagai nilai tekanan kontak,  $p$ . Langkah-langkah simulasi *FEM* adalah dengan menggambar



geometri model, menentukan sifat-sifat material, menentukan *loads*, menentukan kondisi batas (*constraints*) dan *solve*.



**Gambar 3.1.** Diagram alir simulasi keausan menggunakan *FEM*.

Setelah melakukan simulasi awal, maka dilakukan simulasi berikutnya dengan menggambar model baru kemudian memberikan beban dan kondisi batas (*constraints*) yang tepat. Saat menggambar model yang baru diusahakan sedemikian rupa sehingga didapatkan model yang senyata mungkin dengan benda aslinya disaat terdeformasi karena terjadi aus.

Daerah dengan gradien tegangan yang lebih tinggi dianjurkan untuk menggunakan *mesh* yang lebih rapat. Semakin banyak jumlah elemen di dalam model tersebut, akan semakin akurat pula hasil-hasilnya, tetapi berpengaruh pada meningkatnya waktu perhitungan dan penggunaan memori komputer.

Setelah solusi tegangan akibat kontak diperoleh, selanjutnya menentukan status dari tiap elemen kontak (yang terjadi kontak atau tidak). Koordinat-koordinat nodal kontak dari elemen yang terjadi kontak menggambarkan lokasi daerah kontak. *Nodal stress* dari titik di dalam daerah kontak merupakan distribusi tekanan kontak.

Metode Euler digunakan untuk mengintegrasikan hukum keausan berkenaan dengan waktu. Untuk tiap tahap simulasi keausan, parameter-parameter sistem diasumsikan konstan dan mendukung ketinggian keausan pada setiap titik nodal menurut penggambaran model keausan.

$$h_{i+1}^w = h_i^w + \Delta h_{i+1}^w \quad (3.5)$$

dimana,

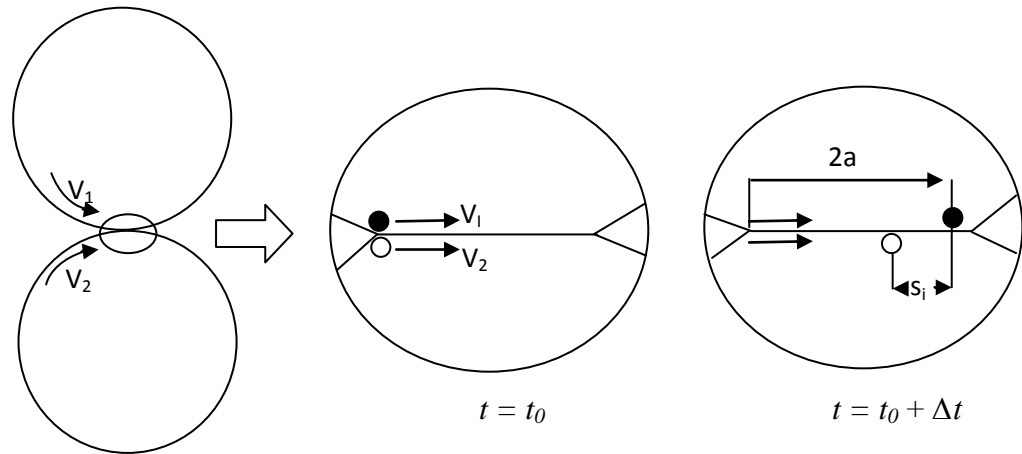
$$\Delta h_{i+1}^w = \text{kenaikan tinggi keausan (mm) pada titik } i+1$$

dengan diketahuinya distribusi tegangan, kenaikan tinggi keausan nodal  $\Delta h_{i+1}^w$  (mm) dapat dihitung.

### 3.4 Metode prediksi keausan Andersson [14]

Metode prediksi yang dilakukan Andersson berawal dari metode keausan dari Archard [15]. Dalam perhitungannya Andersson memodifikasi perhitungan Archard dengan memasukan jumlah number rotasi didalamnya. Dimana dalam rolling terjadi

sliding yang berbeda-beda untuk tiap rotasinya tergantung pada luas kontak area yang terbentuk. Untuk mendapatkan nilai keausan yang terjadi memasukan rotasi pada perhitungan tidak boleh terlalu besar karena apabila memasukan rotasi dengan jumlah rotasi yang besar, maka nilai keausan yang terjadi tidak akan bernilai akurat.



**Gambar 3.2.** Prinsip dasar untuk menentukan *sliding distance* pada *rolling* dan *sliding contact* [14 ].

Untuk mekanisme rolling terjadinya *slip* karena adanya perbedaan kecepatan linier antara dua benda yang saling kontak. Terlihat pada gambar 3.2 dimana  $V_1$  adalah kecepatan linier benda 1 dan  $V_2$  adalah kecepatan linier untuk benda 2. Untuk panjang jarak *sliding* adalah  $s_i$ .

$$s_i = 2a \cdot \frac{[V_1 - V_2]}{V_i} \quad (3.6)$$

dimana  $a$  adalah setengah dari lebar kontak yang terbentuk,  $V_1$  kecepatan untuk benda 1 dan  $V_2$  kecepatan untuk benda 2,  $i$  adalah faktor yang akan menunjukkan pemakaian benda tersebut, dengan  $i = 1$  merupakan benda dipilih untuk benda 1 dan  $i = 2$  merupakan benda dipilih adalah benda 2. Untuk menentukan jarak *sliding contact* dapat digunakan persamaan (3.6) pada *rolling*.

Untuk dua silinder yang berputar dengan radius  $R$ . Berputarnya benda tersebut disertai dengan pembebanan  $F_N$  dengan kecepatan sudut  $\omega_1$  dan  $\omega_2$ . Selanjutnya kecepatan sudut dirubah menjadi kecepatan linier  $V_1 = \omega_1.R$  dan  $V_2 = \omega_2.R$ . Kemudian keausan dapat dihitung.

$$\frac{dh_i}{dt} = k_D \cdot p \cdot V_{s,i} \quad (3.7)$$

dimana  $i = 1$  untuk benda 1 dan  $i = 2$  untuk benda 2.  $h_i$  merupakan kedalaman aus yang terjadi pada titik  $i$ ,  $k_D$  adalah wear koeficient untuk point pada benda  $i$ ,  $p$  adalah lokal contact pressure dan  $V_{s,i}$  adalah kecepatan sliding point  $i$ . Untuk kecepatan sliding dapat dihitung dengan.

$$V_{s,i} = [V_1 - V_2] \quad (3.8)$$

Dengan asumsi benda berputar dengan pembebanan dan kecepatan sudut yang bernilai konstan. Nilai keausan akan diperoleh dari hasil integral:

$$h_i = k_D \cdot [V_1 - V_2] \cdot \int_0^t p dt \quad (3.9)$$

*Contact pressure*,  $p$ , dapat kita ganti dengan nilai *contact pressure* rata-rata,  $p_m$ . Penentuan kedalaman aus ini dapat digunakan untuk seluruh simulasi untuk revolusi keseluruhan putaran benda. Dengan metode integral dapat digunakan perhitungan keausan:

$$h_{i_{new}} = h_{i_{old}} + k_D \cdot p_m \cdot [V_1 - V_2] \cdot \Delta t \quad (3.10)$$

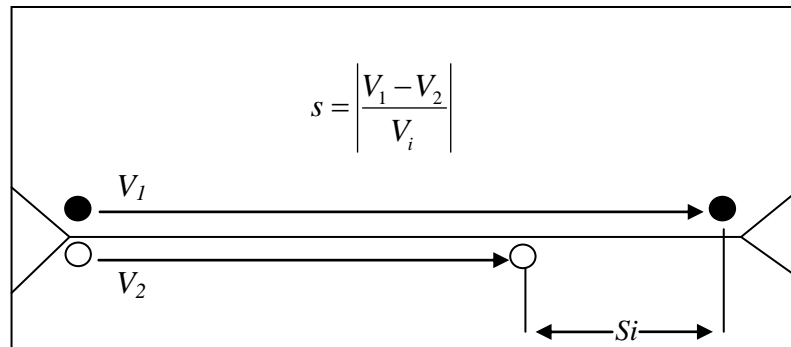
Jika nilai  $\Delta t$  sangat kecil maka dapat pula menggunakan perhitungan dengan menggunakan nilai dari jarak kontak area yang terbentuk dan merubah faktor waktu dengan jumlah rotasi,  $n_1$  yang diinginkan seperti perhitungan 3.11 yaitu:

$$h_{i/longtime} = k_D \cdot p_m \cdot \frac{|V_1 - V_2|}{V_i} \cdot 2a \cdot n_1 \quad (3.11)$$

Dalam mencari perbedaan selisih kecepatan linier antara benda satu dan benda dua yang disebut *slip* tak berdimensi digunakan metode perhitungan:

$$s = \left| \frac{V_1 - V_2}{V_i} \right| \quad (3.12)$$

dimana  $V_1$  merupakan kecepatan linier dari *disc* 1 dan  $V_2$  adalah kecepatan linier dari *disc* 2. Jarak *sliding* terjadi akibat adanya perbedaan kecepatan antara *disc* 1 dengan *disc* 2 yang disebabkan adanya *slip*. Nilai *slip* yang semakin besar akan mempengaruhi nilai tinggi keausan pada *disc*. Jarak *sliding* saat dua buah benda yang saling kontak permukaan berbanding lurus dengan nilai *slip*, terlihat dalam gambar (3.3) berikut:



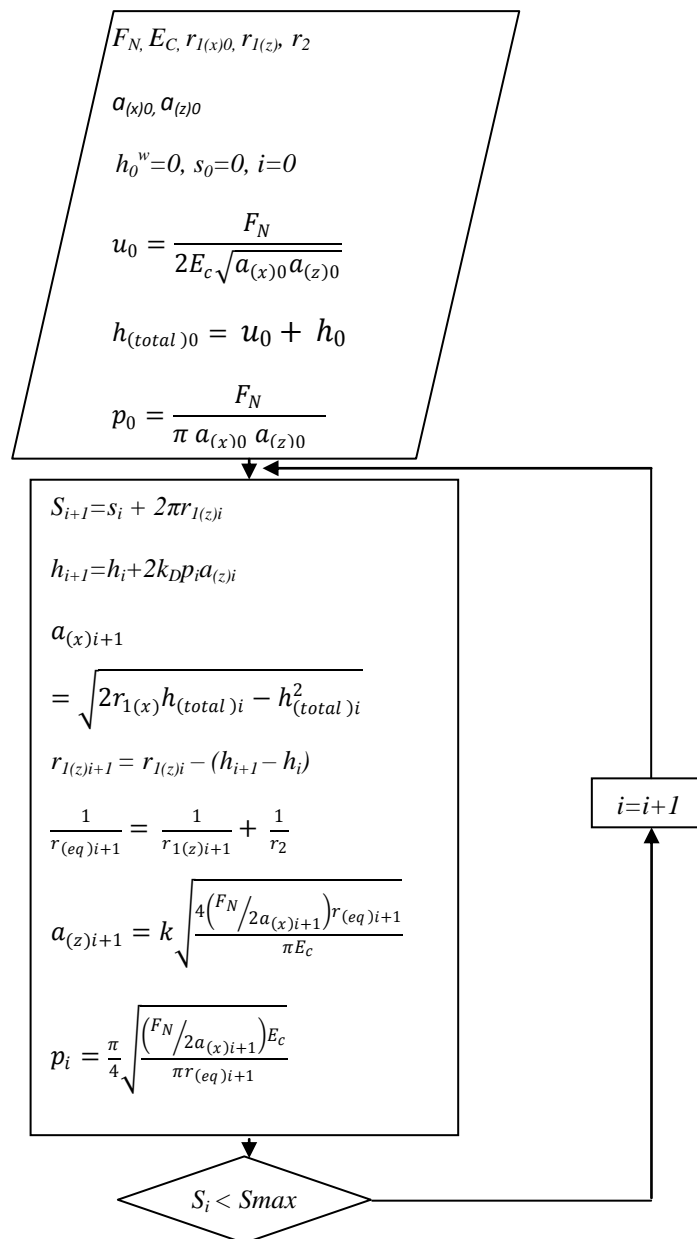
**Gambar 3.3.** *Slip* yang terjadi pada *rolling-sliding contact*.

Apabila sistem yang mengalami kontak *rolling-sliding* tidak terjadi *slip* maka tiap titik kontak permukaan tidak akan mengalami perubahan saat *disc* 1 dengan *disc* 2 berputar, dengan demikian benda yang saling mengalami kontak permukaan tersebut tidak mengalami *sliding*, sehingga dapat dikatakan bahwa benda tersebut tidak mengalami keausan.

### 3.5 Metode prediksi keausan Hegadekatte [19]

#### 3.5.1 Metode analitik

*Global incremental wear model (GIWM)* adalah sebuah metode pendekatan nilai keausan secara analitik yang ditawarkan oleh Hegadekatte. Istilah “*global*” digunakan untuk menunjukkan bahwa skema pemodelan keausan ini hanya mempertimbangkan jumlah secara menyeluruh (*global*), seperti tekanan kontak rata-rata dan bukan jumlah yang lebih spesifik pada suatu lokasi, misal tekanan kontak lokal.



**Gambar 3.4.** Diagram alir simulasi keausan *disc* menggunakan *GIWM*.

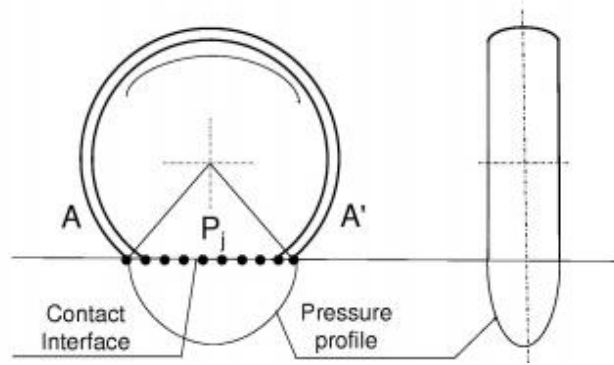
### 3.5.2 Metode elemen hingga (FEM)

Hegadekatte telah membuat sebuah metode perhitungan keausan menggunakan metode elemen hingga yang merupakan pengembangan dari metode elemen hingga yang telah dilakukan oleh Andersson [14]. Perbedaan paling mendasar antara metode elemen hingga Hegadekatte dengan Andersson adalah dalam perhitungannya Hegadekatte menggunakan  $\Delta t$  untuk setiap tahap kenaikan keausan yang terjadi sedangkan Andersson menggunakan jumlah number rotasi pada kenaikan keausannya.

Secara konsep, langkah-langkah yang dilakukan oleh Hegadekatte dalam penggunaan elemen hingga adalah sama dengan yang dilakukan oleh Andersson. *FEM* untuk mengetahui nilai tekanan kontak (*contact pressure*). Dimana ketika melakukan simulasi terdapat dua benda yang dimodelkan kemudian kita masukan parameter yang akan disimulasikan. Benda tersebut dalam simulasi tidak digerakan namun salah satu benda dibuat rigid. Dan simulasi yang dilakukan adalah melakukan tekanan statis untuk mendapatkan kontak area yang terbentuk dari simulasi penekanan tersebut dan nilai *contact pressure* rata-rata yang didapatkan akan dimasukan dalam perhitungan analitik sehingga nilai keausan pun akan dapat diketahui.

### 3.6 Metode prediksi keausan Kanavalli [20]

Kanavalli telah melakukan suatu perhitungan keausan *rolling sliding* dengan cara membandingkan antara hasil pengujian dengan simulasi menggunakan *Finite Element Method (FEM)*. Tugas utama dari *FEM* adalah untuk menghitung tekanan kontak (*contact pressure*). Dimana ketika melakukan simulasi terdapat dua benda yang dimodelkan kemudian kita masukan parameter yang akan disimulasikan. Benda tersebut dalam simulasi tidak digerakan namun salah satu benda dibuat rigid. Dan simulasi yang dilakukan adalah melakukan tekanan statis untuk mendapatkan kontak area yang terbentuk dari simulasi penekanan tersebut dan nilai kontak pressure rata-rata yang didapatkan akan dimasukan dalam perhitungan analitik sehingga nilai keausan pun akan dapat diketahui.



**Gambar 3.5.** Gambar menunjukkan posisi yang berbeda diasumsikan oleh titik nodal referensi [20].

Pertimbangan referensi titik nodal A sampai A', pada permukaan atas dari *disc*, yang kontak dengan *disc* bawah. Karena *disc* berputar, tekanan kontak pada titik nodal ini meningkat dari nol sampai maksimum dan kemudian menurun secara bertahap menjadi nol (lihat Gambar 3.4). Titik nodal mengalami tekanan yaitu ketika bergerak melalui kontak *interface*. Oleh karena itu, tekanan bekerja pada titik ini di sepanjang jarak geser yang merupakan keliling *disc*. Untuk satu rotasi dari *disc*, keausan berlangsung pada titik nodal ini, pada *disc* atas, dapat ditulis dengan persamaan,

$$h_{i+1} = h_i + k_D \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} p_j R_{1j} d\theta \quad (3.13)$$

Dimana  $\theta$  adalah koordinat keliling dari *disc*, simbol  $j$  untuk posisi yang menempati selama *disc* berputar dengan perubahan sudut  $d\theta$ ,  $R_{1i}$  adalah radius *disc* yang atas pada kenaikan keausan  $i^{th}$ . Untuk menentukan kenaikan waktu,  $\Delta t$ , *disc* atas dibua  $\frac{\Delta t |(V_1 - V_2)|}{2\pi R_{1i}}$  rotasi. Dimana  $V_1$  dan  $V_2$  adalah kecepatan *disc* atas dan *disc* bawah.

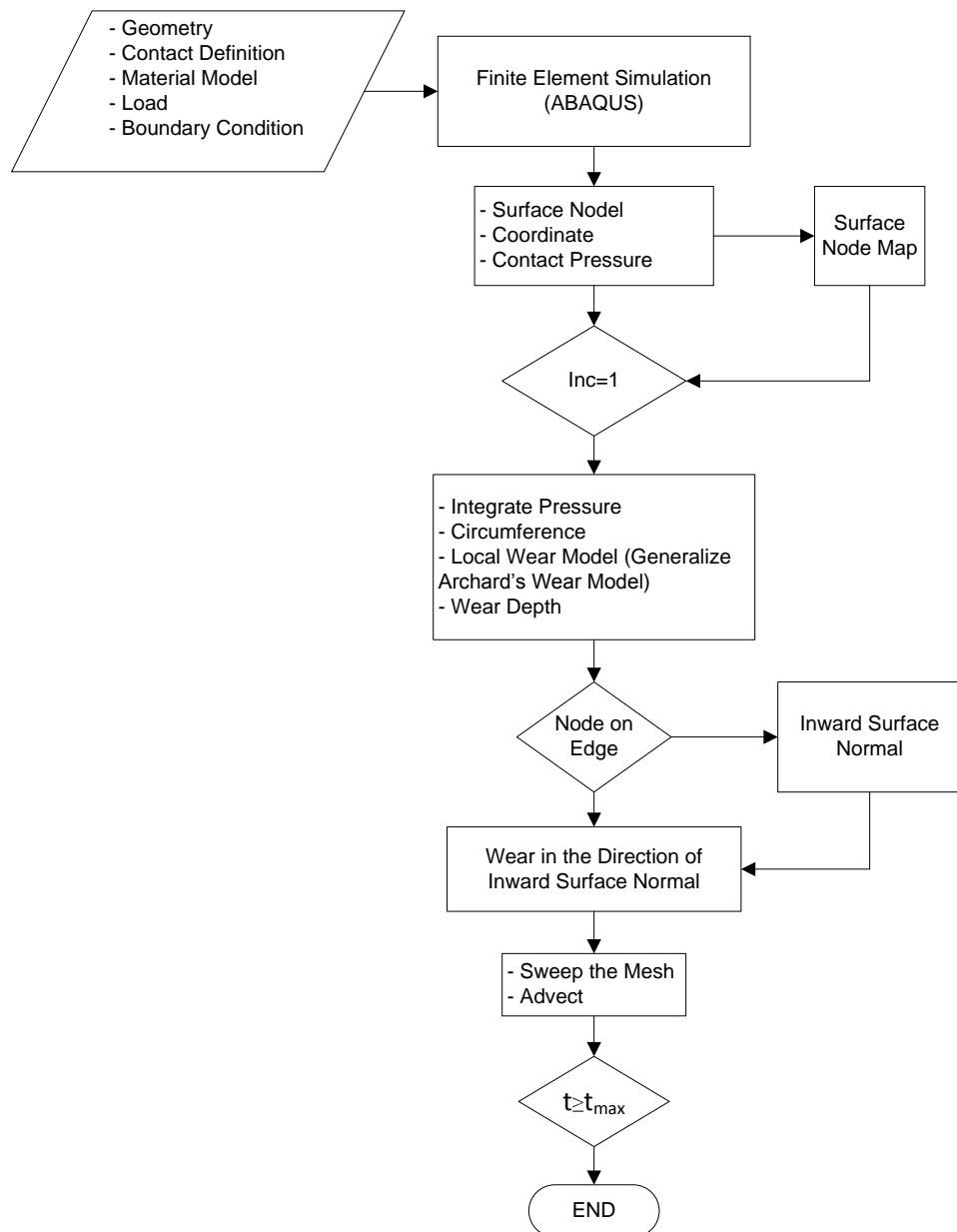
Kemudian untuk sebuah kenaikan waktu dari  $\Delta t_i$ , adalah,

$$h_{i+1} = h_i + k_D \frac{\Delta t_i |(V_1 - V_2)|}{2\pi R_{1i}} \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} p_j R_{1j} d\theta \quad (3.14)$$



Ini adalah model keausan Archard yang digunakan dalam permasalahan kontak *rolling-sliding*. Pada persamaan 3.5 disebut sebagai “*generalized Archard’s wear model*”. Kedalaman keausan dihitung menggunakan persamaan 3.5 untuk setiap permukaan titik nodal.

Diagram alir dari prosedur simulasi keausan memakai *FEM* ditunjukkan dalam Gambar 3.5.



**Gambar 3.6.** Diagram alir simulasi keausan dalam *twin-disc tribometer*.

Setelah melakukan simulasi awal, maka dilakukan simulasi berikutnya dengan menggambar model baru kemudian memberikan beban dan kondisi batas (*constraints*) yang tepat. Saat menggambar model yang baru diusahakan sedemikian rupa sehingga didapatkan model yang senyata mungkin dengan benda aslinya disaat terdeformasi karena terjadi aus.

Daerah dengan gradien tegangan yang lebih tinggi dianjurkan untuk menggunakan *mesh* yang lebih rapat. Semakin banyak jumlah elemen di dalam model tersebut, akan semakin akurat pula hasil-hasilnya, tetapi berpengaruh pada meningkatnya waktu perhitungan dan penggunaan memori komputer.

Setelah solusi tegangan akibat kontak diperoleh, selanjutnya menentukan status dari tiap elemen kontak (yang terjadi kontak atau tidak). Koordinat-koordinat nodal kontak dari elemen yang terjadi kontak menggambarkan lokasi daerah kontak. *Nodal stress* dari titik di dalam daerah kontak merupakan distribusi tekanan kontak.

### 3.7 Metode prediksi keausan Rodriguez [21]

Perhitungan numerik baru untuk simulasi keausan pada kontak 3D dan *rolling-contact problems*. Formulasi ini didasarkan pada *boundary element method (BEM)* untuk menghitung pengaruh koefisien elastis dan untuk pemenuhan kontak batas. *BEM* mempertimbangkan derajat kebebasan yang terjadi pada masalah semacam ini (padatan permukaan). Dalam perhitungan tinggi keausan terhadap suatu benda, *BEM* pun mengacu pada perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya dalam perhitungan tinggi keausan yang dilakukan oleh peneliti keausan Archard, *boundary element method* dapat digunakan untuk perhitungan tinggi keausan untuk benda yang mengalami *sliding*, *rolling* dan *rolling-sliding contact*. Beberapa prediksi perhitungan tinggi keausan oleh *BEM* sudah banyak divalidasikan dengan perhitungan tinggi keausan yg telah dilakukan oleh beberapa peneliti keausan dan hasilnya sangat mendekati.

### 3.8 Ringkasan

Setelah melihat beberapa studi pustaka pada bagian sub-bab sebelumnya, beberapa catatan penting dari hasil tinjauan pustaka ini adalah pada model keausan Archard 1953 mengusulkan suatu model pendekatan untuk mendeskripsikan keausan

*sliding*. Dia berasumsi bahwa parameter kritis dalam keausan *sliding* adalah medan tegangan di dalam kontak dan jarak *sliding* yang relatif antara permukaan kontak. Model ini sering dikenal sebagai hukum keausan Archard (*Archard's wear law*). Hukum ini digunakan untuk menghitung seberapa besar material yang hilang berdasarkan jarak sliding.

Pada tahun 1980, Sarkar memodifikasi model keausan Archard dengan pertimbangan adanya suatu koefisien gesek antara permukaan yang saling bergesekan. Seperti yang didiskusikan sebelumnya, hubungan antara koefisien gesek dan tingkat keausan lebih kompleks. Meskipun begitu, Sarkar telah memodifikasi suatu model keausan yang menghubungkan antara koefisien gesek dengan volume yang hilang dari bahan.

Podra telah melakukan suatu perhitungan keausan dengan cara membandingkan antara hasil pengujian dengan simulasi menggunakan *Finite Element Method (FEM)*. Perhitungan keausan memakai *FEM* melibatkan penyelesaian masalah kontak secara umum antara benda yang saling kontak dengan menggunakan model dua dimensi (2D). Metode Euler digunakan untuk mengintegrasikan hukum keausan berkenaan dengan waktu. Untuk tiap tahap simulasi keausan, parameter-parameter sistem diasumsikan konstan dan mendukung ketinggian keausan pada setiap titik nodal menurut penggambaran model keausan.

Metode prediksi yang dilakukan Andersson berawal dari metode keausan dari Archard [15]. Dalam perhitungannya Andersson memodifikasi perhitungan Archard dengan memasukan jumlah number rotasi didalamnya. Dimana dalam rolling terjadi sliding yang berbeda-beda untuk tiap rotasinya tergantung pada luas kontak area yang terbentuk. Untuk mendapatkan nilai keausan yang terjadi memasukan rotasi pada perhitungan tidak boleh terlalu besar karena apabila memasukan rotasi dengan jumlah rotasi yang besar, maka nilai keausan yang terjadi tidak akan bernilai akurat

Hegadekatte telah membuat sebuah metode perhitungan keausan menggunakan dua metode, metode yang pertama adalah metode analitik yaitu *Global incremental wear model (GIWM)* adalah sebuah metode pendekatan nilai keausan secara analitik yang ditawarkan oleh Hegadekatte. Istilah "*global*" digunakan untuk menunjukkan bahwa skema pemodelan keausan ini hanya mempertimbangkan jumlah secara

menyeluruh (*global*), seperti tekanan kontak rata-rata. Metode yang kedua menggunakan metode elemen hingga yang merupakan pengembangan dari metode elemen hingga yang telah dilakukan oleh Andersson. Perbedaan paling mendasar antara metode elemen hingga Hegadekotte dengan Andersson adalah dalam perhitungannya Hegadekotte menggunakan  $\Delta t$  untuk setiap tahap kenaikan keausan yang terjadi sedangkan Andersson menggunakan jumlah number rotasi pada kenaikan keausannya.

Kanavalli melakukan suatu perhitungan keausan yang manegadopsi dari percobaan *pin-on-disc* yang pernah dilakukan oleh Hegadekotte menggunakan *FEM*. Tugas utama dari *FEM* adalah untuk menghitung tekanan kontak (*contact pressure*). Dimana ketika melakukan simulasi terdapat dua benda yang dimodelkan kemudian kita masukan parameter yang akan disimulasikan. Benda tersebut dalam simulasi tidak digerakan namun salah satu benda dibuat *rigid*. Dan simulasi yang dilakukan adalah melakukan tekanan statis untuk mendapatkan kontak area yang terbentuk dari simulasi penekanan tersebut dan nilai kontak *pressure* rata-rata yang didapatkan akan dimasukan dalam perhitungan analitik menggunakan persamaan *generalized Archard's wear model* sehingga nilai keausan pun akan dapat diketahui.

Metode prediksi keausan Rodriguez menggunakan perhitungan numerik baru untuk simulasi keausan pada kontak yang terjadi. Perhitungan numerik ini digunakan untuk simulasi keausan pada kontak 3D dan masalah *rolling-contact*. Formulasi ini didasarkan pada *boundary element method (BEM)* untuk menghitung pengaruh koefisien *elastic* dan untuk pemenuhan kontak batas. Dalam perhitungan tinggi keausan terhadap suatu benda, *BEM* pun mengacu pada perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya dalam perhitungan tinggi keausan yang dilakukan oleh peneliti keausan Archard, *BEM* dapat digunakan untuk perhitungan tinggi keausan untuk benda yang mengalami *sliding*, *rolling* dan *rolling-sliding contact*. [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]

## BAB IV

### PERHITUNGAN KEAUSAN *FEM*

#### 4.1 Metode elemen hingga

Tujuan utama dari sub-bab ini adalah untuk menerapkan model keausan Archard pada skala lokal dan mengidentifikasi parameter koefisien keausan ( $k_D$ ) yang dipakai dengan mencocokkan dengan hasil pengujian. Oleh karena itu, untuk mengidentifikasi koefisien keausan ( $k_D$ ), pengujian *twin-disc* harus disimulasikan dengan metode elemen hingga. Jika hasil simulasi dengan pengujian sudah cocok, kemudian parameter koefisien keausan ( $k_D$ ), yang telah diidentifikasi tersebut dapat digunakan untuk simulasi keausan pada model yang lain.

Simulasi keausan akan dilakukan menggunakan model *twin-disc* tiga dimensi (3D). Ada beberapa alasan mengapa menggunakan model 3D yaitu (1) simulasi keausan menjadi lebih akurat, (2) untuk mempelajari “*leading edge effect*” yaitu adanya lonjakan keausan yang besar pada bagian depan permukaan *disc 1* dibanding bagian belakang *disc 1* dan (3) untuk mempelajari efek dari koefisien gesek pada keausan yang tidak mungkin dilakukan menggunakan model dua dimensi 2D *axisymmetric*

Simulasi keausan menggunakan metode elemen hingga yang dibahas akan digunakan untuk menghitung keausan pada beban 300 N dan *slip* 10%, dengan spesifikasi pemodelan yang sama dengan yang dihitung oleh Hegadekatte di dalam journalnya. Hasil perhitungan dibandingkan dengan hasil yang ada di journal untuk verifikasi, kemudian dilanjutkan dengan prediksi keausan menggunakan beban 200 N, 300 N dan 500 N serta dengan prediksi *slip* 4% , 10% serta 20%.

#### 4.2 Teori dasar metode elemen hingga [22, 23]

Perkembangan dunia komputer telah begitu cepatnya mempengaruhi bidang-bidang penelitian dan industri, sehingga impian para ahli dalam mengembangkan ilmu pengetahuan dan industri telah menjadi kenyataan. Saat ini, metode dan analisa desain telah banyak menggunakan perhitungan matematis yang rumit dalam penggunaan sehari-hari. Metode elemen hingga (FEM) banyak memberikan andil dalam melahirkan

penemuan-penemuan bidang riset dan industri, hal ini dikarenakan dapat berperan sebagai *research tool* pada pengujian secara numerik.

*Finite element method (FEM)*, atau metode elemen hingga adalah suatu metode analisa perhitungan yang didasarkan pada gagasan dalam membangun suatu obyek yang sangat kompleks menjadi beberapa bagian (*blocks*) yang sederhana, atau dengan membagi obyek yang sangat kompleks menjadi kecil dan pengaturan kepingan-kepingan. Aplikasi dari gagasan ini dapat kita temui dalam kehidupan sehari-hari yang sama baiknya dalam keteknikan, seperti permainan bongkar pasang, bangunan, perkiraan area lingkaran dan lain sebagainya.

1. Konsep dasar analisis MEH.
  - a. Menjadikan elemen-elemen diskrit untuk memperoleh simpangan-simpangan dan gaya-gaya anggota dari suatu struktur.
  - b. Menggunakan elemen-elemen kontinum untuk memperoleh solusi pendekatan terhadap permasalahan-permasalahan perpindahan panas, mekanika fluida dan mekanika solid.
2. Prosedur analisa struktur .
  - a. Membagi struktur menjadi kepingan-kepingan (elemen dengan nodal).
  - b. Memberikan sifat-sifat fisik pada tiap elemen.
  - c. Hubungkan elemen-elemen pada tiap nodal untuk membentuk sebuah sistem perkiraan dari persamaan untuk struktur tersebut.
  - d. Menyelesaikan sistem persamaan tersebut yang disertai dengan jumlah yang tidak dikenal di titik simpul (contoh: perpindahan)
  - e. Hitung jumlah yang diinginkan (contoh: *strains* dan *stresses*)
3. Implementasi-implementasi pada komputer
  - a. Preprocessing (membuat *FE model*, *loads* dan *constraints*)
  - b. FEA solver (merakit dan penyelesaian sistem persamaan)
  - c. Postprocessing (menampilkan hasil)
4. Jenis elemen-elemen pada metode elemen hingga
  - a. Elemen satu dimensi (garis)
 

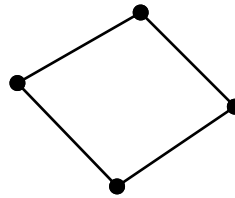
Jenis elemen ini meliputi pegas (*spring*), *truss*, *beam*, *pipe* dan lain sebagainya, seperti terlihat pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1.** Elemen garis

b. Elemen dua dimensi (bidang)

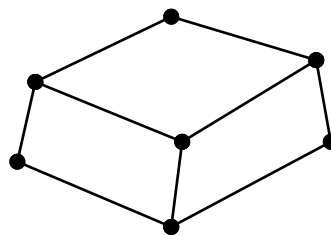
Jenis elemen ini meliputi membran, *plate*, *shell* dan lain sebagainya seperti pada Gambar 4.2.



**Gambar 4.2.** Elemen bidang

c. Elemen tiga dimensi (volume)

Jenis elemen ini meliputi (*3-D Fields-temperature, displacement, stress, flow velocity*), seperti pada Gambar 4.3.



**Gambar 4.3.** Elemen volum

### 4.3 Metodologi pemodelan

Perlu diperhatikan bahwa disini tidak akan melakukan proses simulasi *rolling*, tetapi sebagai gantinya hanya melakukan simulasi kontak statis kedua benda yang dapat menghasilkan kontak area kemudian memperbaharui permukaan pada tiap tingkat menjadi senyata mungkin dengan melakukan *update geometri* dari benda hasil simulasi.

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat diagram alir pada Gambar 4.4, proses keausan dimulai dengan menyelesaikan analisa kontak statis tiga dimensi (3D) antara dua benda yang dapat terdeformasi. Penyelesaian semua ini dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software* ABAQUS 6.10-1.

Setelah dilakukan simulasi, maka akan kita dapatkan hasil berupa tegangan searah sumbu-y ( $\sigma_y$ ) disaat statis dan nilai tersebut digunakan dalam persamaan model keausan Andersson dengan mengambil nilai *contact pressure average* ( $p_m$ ).

$$h_i = k_D \cdot [V_1 - V_2] \cdot \int_0^t p dt \quad (4.1)$$

Dimana  $h_{new}$  adalah nilai kedalaman keausan (mm), untuk variabel  $k_D$  adalah nilai konstan yang didapat dari hasil pengujian yaitu  $10E-8 \text{ mm}^2/\text{N}$ , sedangkan untuk nilai  $k_D$  dari material yang lain dapat dilihat pada Tabel 4.1, dan nilai dari variabel  $\Delta t$  adalah waktu yang diperlukan saat benda berotasi.

**Tabel 4.1.** Nilai koefisien keausan untuk beberapa material [19].

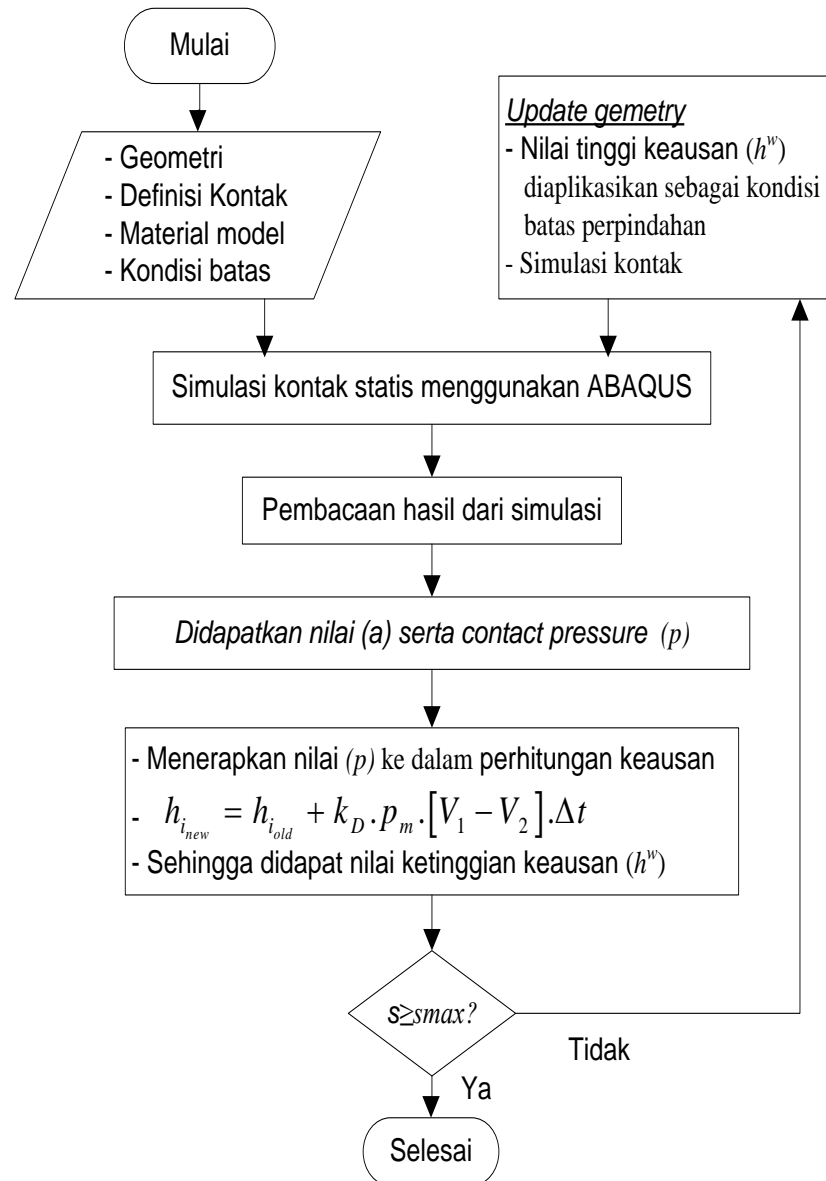
Material	Koefisien keausan berdimensi ( $k_D$ )
PTFE/Steel	$92E-8 \text{ mm}^3/\text{Nmm}$
DLC/WC	$21E-11 \text{ mm}^3/\text{Nmm}$
Steel/Steel	$12E-8 \text{ mm}^3/\text{Nmm}$
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$	$13.5E-9 \text{ mm}^3/\text{Nmm}$

Integral dari kenaikan keausan linear dihitung menggunakan:

$$h_{i_{new}} = h_{i_{old}} + k_D \cdot p_m \cdot [V_1 - V_2] \cdot \Delta t \quad (4.2)$$

dimana  $i$  adalah *incremental* yang artinya adalah kenaikan tingkat, jadi variabel  $h_{i_{new}}$  adalah kenaikan tingkat nilai ketinggian keausan. Dari hal inilah maka akan kita dapatkan beberapa nilai keausan yang berbeda-beda bergantung jumlah rotasi, kemudian akan membentuk suatu grafik keausan terhadap jumlah rotasi.





**Gambar 4.4.** Diagram alir untuk simulasi keausan *FEM*.

#### 4.4 Spesifikasi pemodelan *twin-disc*

Geometri lebih rinci dari model *twin-disc* dapat dilihat pada Gambar 4.5 (a) dan keterangan nilai dari beberapa parameter untuk  $F_N$  adalah gaya normal,  $R_{P(x)}$  adalah jari-jari *disc* terhadap sumbu x,  $R_{P(z)}$  jari-jari pin terhadap sumbu z,  $R_D$  adalah jari-jari *disc* dan  $t_D$  adalah ketebalan *disc* yang semua itu dapat dilihat pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2.** Parameter-parameter untuk geometri *twin-disc* [20].

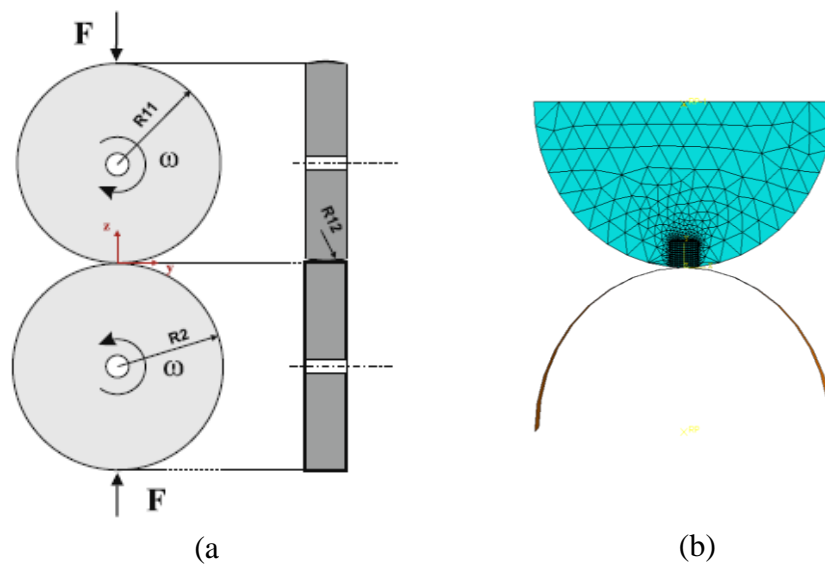
Parameter	Nilai
Jari-jari <i>disc 1</i>	$R_1 = 4 \text{ mm}$
Jari-jari <i>disc 2</i>	$R_2 = 4 \text{ mm}$
Ketebalan <i>disc 2</i>	$t_D = 1 \text{ mm}$
Gaya normal (verifikasi) Gaya normal (prediksi)	$F = 300 \text{ N}$ $F = 200 \text{ N}, 400 \text{ N}, 500 \text{ N}$

Hasil yang akan didapatkan bergantung dari pembagian elemen pada model tersebut yang disebut sebagai “*meshing*”. Semakin banyak atau semakin rapat pembagian elemennya maka akan kita dapatkan hasil yang lebih akurat. Namun dengan semakin banyaknya pembagian elemen maka akan diikuti dengan semakin lamanya proses simulasi atau disebut sebagai “*running*”.

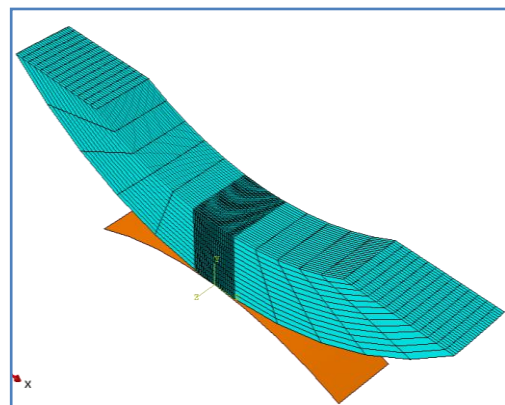
Untuk mengatasi hal tersebut maka kita membuat model yang berdimensi lebih kecil dan melakukan pembagian elemennya hanya dibagian yang kontak saja yang lebih rapat seperti Gambar 4.5 (a), dengan cara ini maka waktu *running* akan lebih cepat. Namun dari model dengan geometri tersebut harus kita verifikasi dengan teori kontak Hertz, sehingga kita yakin bahwa model yang telah kita buat sudah benar seperti pada Gambar 4.5 (b). Untuk selanjutnya yang akan digunakan adalah model geometri yang berdimensi kecil yang telah diverifikasi tersebut.

Kondisi batas diterapkan pada geometri *twin-disc*. Untuk permukaan bagian bawah *disc* ditetapkan tidak dapat bergerak ke seluruh arah sumbu. Saat terjadi kontak statis, bagian permukaan atas *disc 1* ditetapkan boleh bergerak searah sumbu-y tetapi tidak dapat bergerak searah sumbu-x, sumbu-z dan tidak dapat berotasi kesemua arah.

Material yang digunakan adalah  $\text{CrO}_2$  dengan modulus elastisitas  $E = 152 \text{ GPa}$ , *poissons' ratio*  $\nu = 0.32$ . Koefisien gesek yang dipakai pada proses simulasi didasarkan pada nilai rata-rata yang diambil dari hasil pengujian yang telah dilakukan oleh Hegadekatte yaitu 0.6. [19]



**Gambar 4.5.** (a) Model *twin-disc* pada *rolling*, (b) Model FEM.



**Gambar 4.6.** Model *twin-disc* dengan dimensi lebih kecil.

#### 4.5 Menentukan kenaikan jarak *sliding*

Penentuan nilai kenaikan waktu,  $\Delta t$ , sangatlah penting, karena akan sangat berpengaruh terhadap nilai pendekatan keausan yang akan kita prediksi. Jika penentuan nilai kenaikan waktu besar, maka perhitungan keausan menjadi kacau, sebaliknya jika penentuan nilainya kecil maka perhitungan prediksi menjadi lama. Jadi dibutuhkan suatu nilai yang proporsional terhadap perubahan tekanan kontak rata-rata dan perubahan *contact area* yang terjadi selama proses keausan.

$$\Delta t = \frac{2a}{V_1} \cdot n_1 \quad (4.3)$$

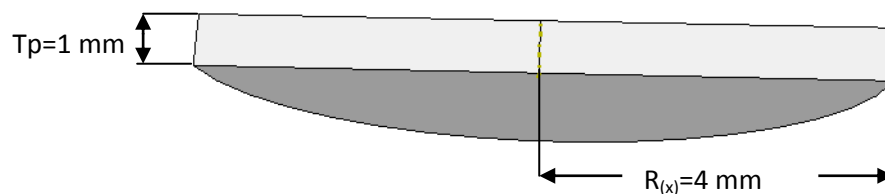
dimana  $\Delta t$  adalah kenaikan tahap keausan (s),  $a$  adalah setengah dari lebar kontak (mm),  $V_1$  kecepatan dari benda 1 (mm/s) dan  $n_1$  rotasi benda. Namun jumlah rotasi yang dimasukan tidak boleh terlalu besar karena bila rotasi terlalu besar maka diawal tahap increment akan terjadi kedalaman keausan yang langsung meningkat..

#### 4.6 Prosedur pembuatan model *twin-disc* [24]

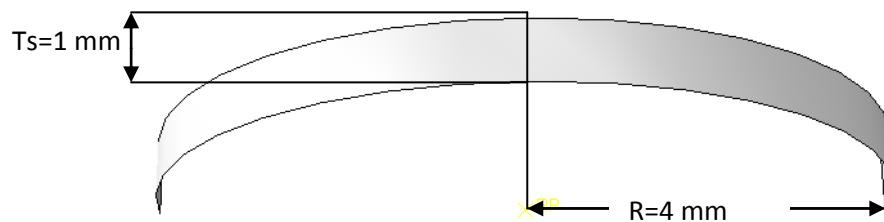
Pada sub-bab ini akan dijelaskan secara singkat bagaimana membuat model *FEM* menggunakan *software* ABAQUS 6.10-1.

1. Membuat bagian-bagian dari model (*part*).

Membuat model *disc 1* dan *disc* dengan geometri seperti pada gambar berikut.



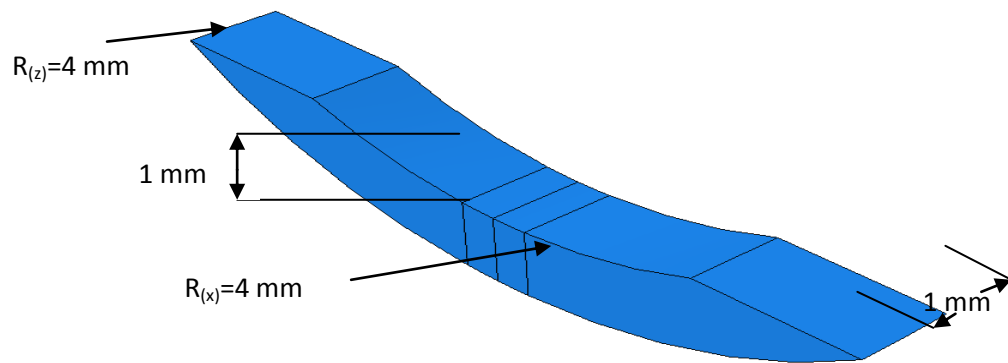
(a)



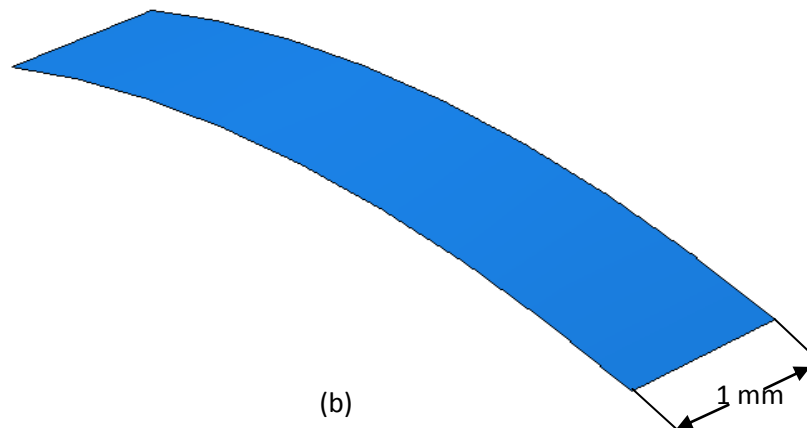
(b)

**Gambar 4.7.** Geometri model (a) *disc 1 deformable*, (b) *disc analitical rigid*.

2. Memotong model *disc 1* dan *disc* menjadi kecil seperti pada gambar.



(a)



(b)

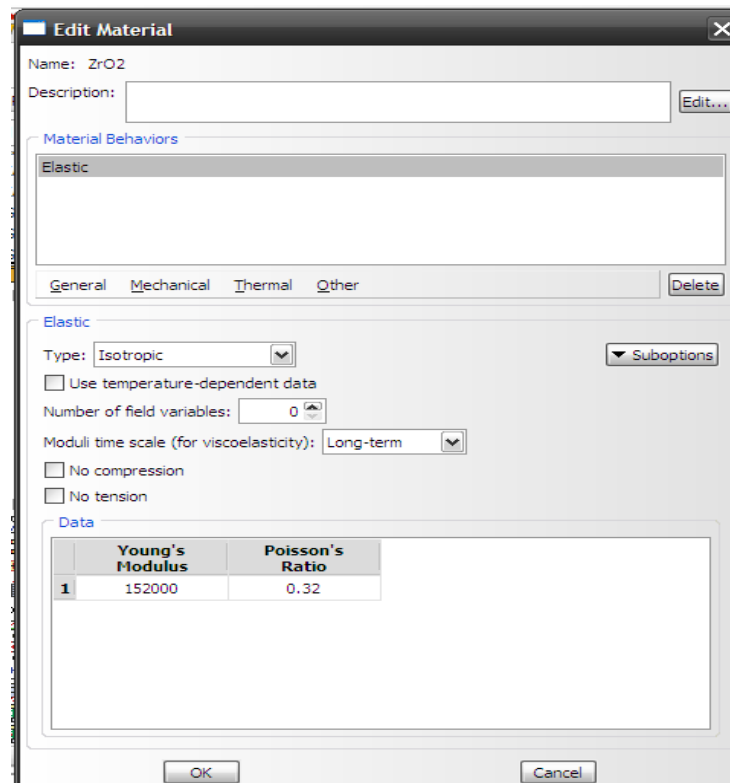
**Gambar 4.8.** Geometri model diperkecil (a) *disc 1*, dan (b) *disc 2*.

3. Menentukan sifat material pada model (*property*).

- a. Penentuan sifat material elastis.

Berikut ini adalah cara menentukan sifat material *elastic*:

Pada *Abaqus* pilih *Module* > *Property* > *Create Material* > *Mechanical* > *Elasticity* > *Elastic*.



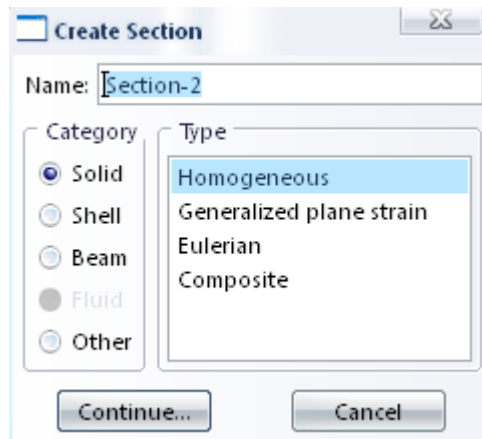
**Gambar 4.9.** Material elastis.

Dari Gambar 4.11 masukkan nilai *modulus young* sebesar 152000 MPa dan *Poisson's ratio* 0,32.

- b. Memasukkan sifat material ke dalam pemodelan.

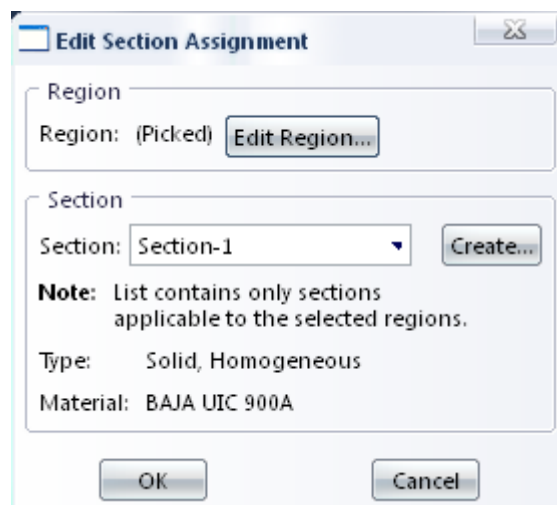
Setelah penentuan sifat material selesai, masukkan sifat material tersebut ke dalam model yang telah dibuat. Berikut ini adalah cara memasukkan sifat material ke dalam model.

- 1) Dari menu *Abaqus* pilih *Module > Property > Create Section > Category : Solid > Type : Homogeneous > Continue*.



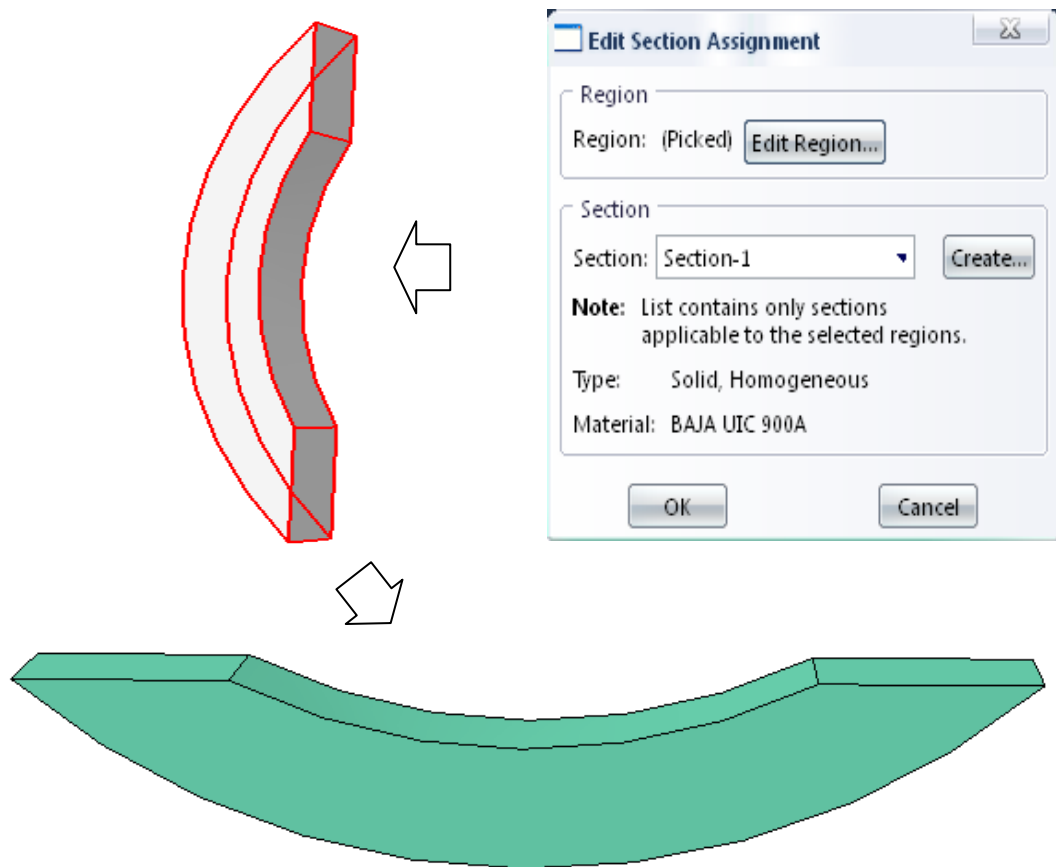
**Gambar 4.10.** *Create section.*

- 2) Setelah klik *continue* maka akan muncul pilihan *edit section* lanjutkan dengan klik *Ok*.



**Gambar 4.11.** *Edit section.*

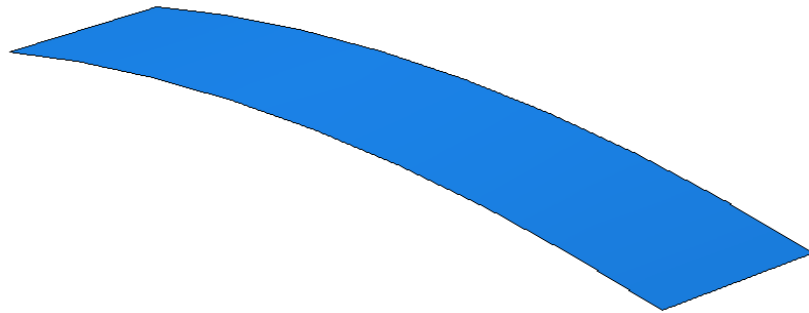
- 3) Langkah selanjutnya adalah memasukkan *section* tersebut ke dalam pemodelan pada *part 1*. Dari *Module Abaqus > Property > Assign Section > blok pada model > Edit Section Assignment > Ok*.



**Gambar 4.12.** *Section assignment part 1.*

- 4) Langkah selanjutnya adalah memastikan bahwa pemodelan *part 2* sudah *analitical rigid* sehingga part tidak perlu diberikan parameter material, hal ini karena benda yang sudah kita *input* dengan *analitikal rigid* secara otomatis benda tersebut akan diasumsikan memiliki kekerasan material yang sangat keras sehingga benda tersebut tidak dapat mengalami perubahan *deformasi* ketika dilakukan proses simulasi penekanan.



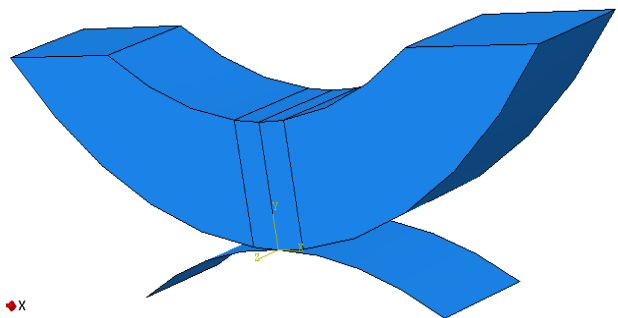
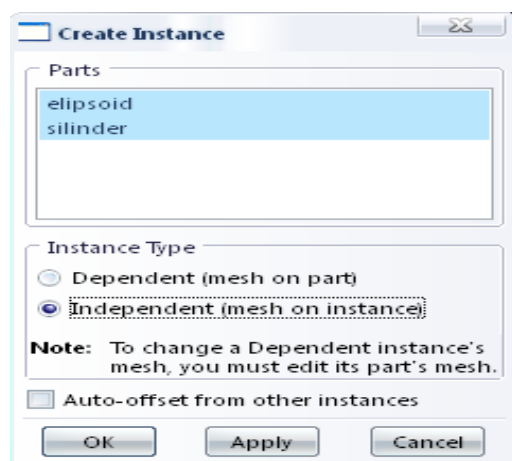


**Gambar 4.13.** *Analitical rigid part 2.*

4. Menggabungkan bagian dari part hingga menjadi model (*assembly*).

Karena pemodelan menggunakan dua buah *part* yaitu *part 1* dan *part 2* maka kedua *part* tersebut harus digabungkan menjadi satu kesatuan. Berikut ini adalah cara menggabungkan (*assembly*) *part 1* dan *part 2*:

*Module > Assembly > Instan Part > Create Instan Part > Independent (mesh on instance) >Ok.*



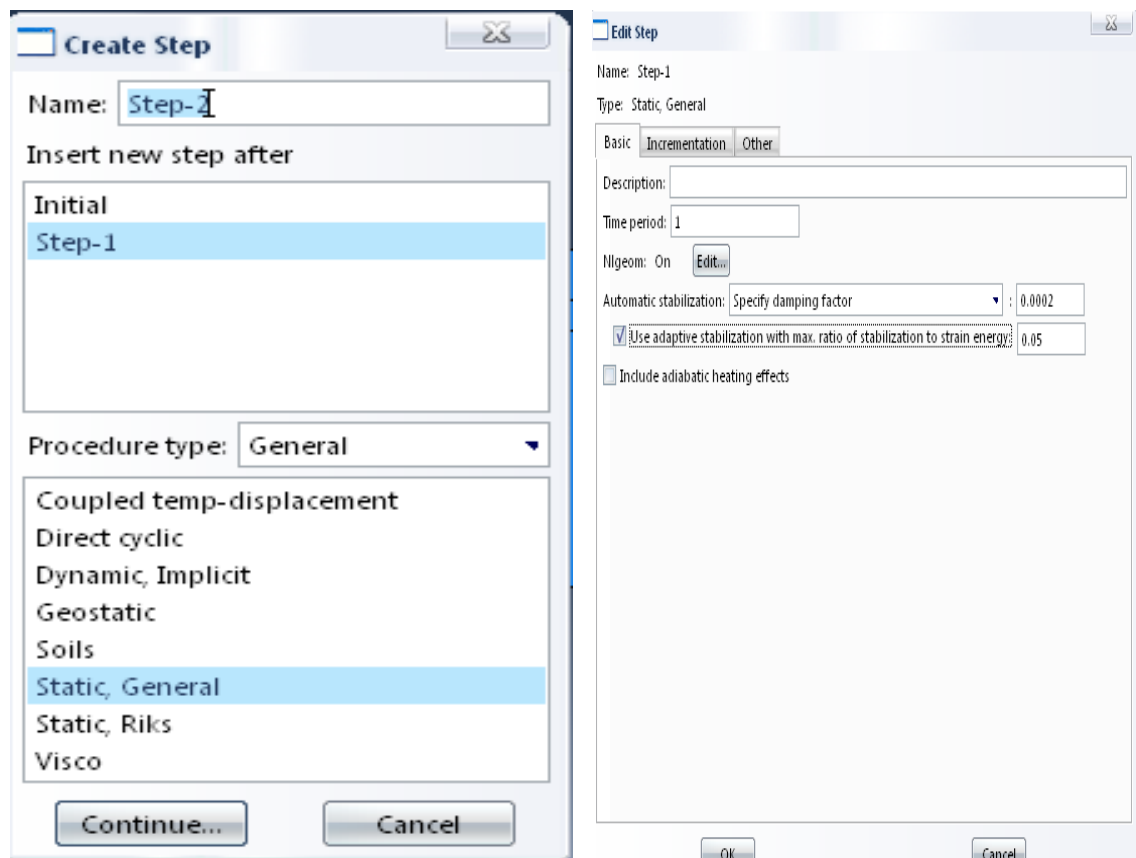
**Gambar 4.14.** *Assembly part 1 dan part 2.*

5. Menentukan jenis analisa dari FEM (*step*).

*Step* adalah langkah yang nantinya digunakan dalam proses simulasi *Abaqus*, *step* sendiri berfungsi untuk menentukan langkah – langkah analisa, menentukan *out put*

yang diinginkan dan membatasi analisa sesuai dengan analisa yang dikehendaki. Berikut ini adalah cara untuk membuat step pada pemodelan. Dari *Module > Step > Create Step > Prosedure Type: General > Static General > Continue.*

*Basic > NLgeom on > pilih use stabilization dan include adiabatic heating effect. NLgeom dihidupkan sehingga posisi menjadi on.*



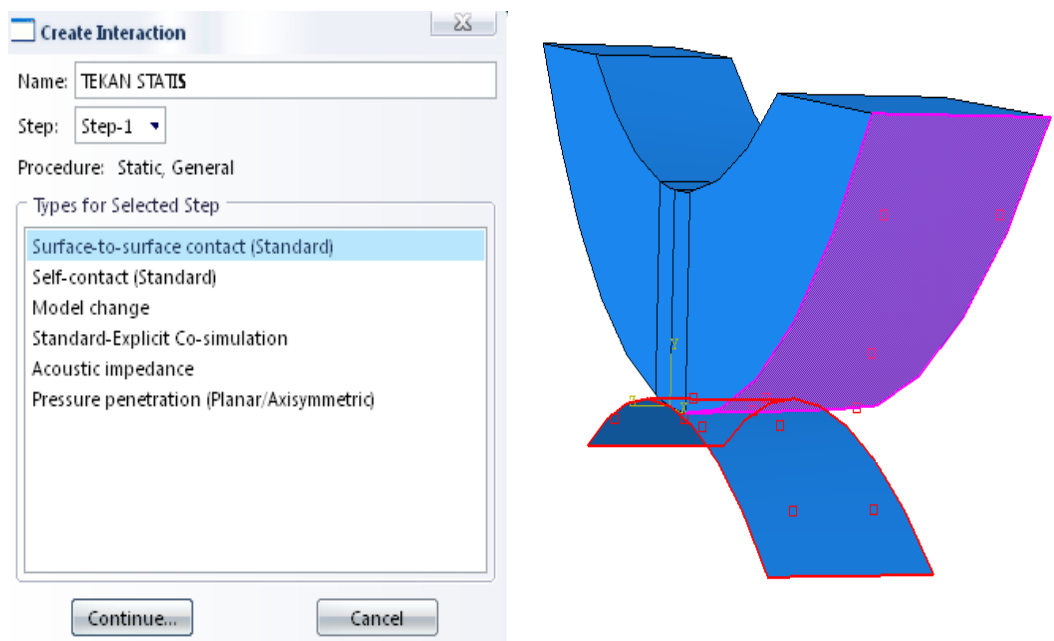
**Gambar 4.15.** *Create step.*

#### 6. Menentukan pasangan kontak (*interaction*).

*Interaction* digunakan untuk membuat *contact*, seperti penentuan *master* dan *slave contact*, penentuan *contact properties*, dan interaksi mekanika.

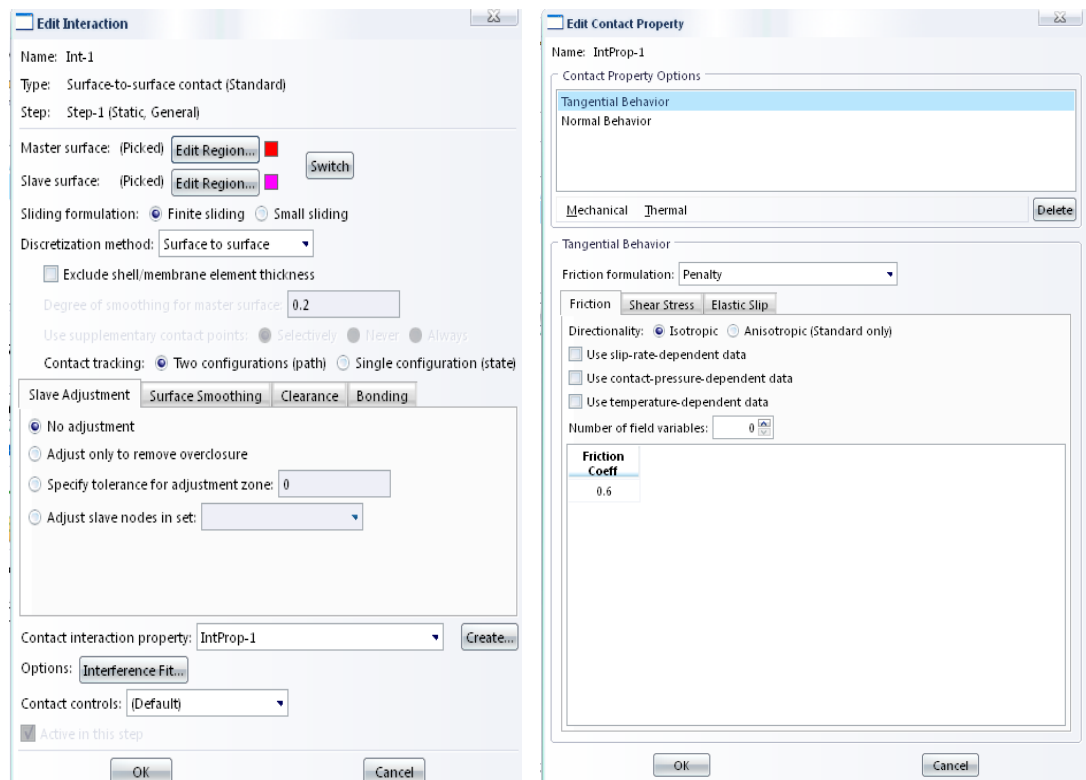
Berikut ini adalah cara membuat *interaction* pada permodelan:

- a. Pada Abaqus pilih *module > interaction > create Interaction > surface to surface contact > continue*. Selanjutnya pilih *master contact* pada *area contact* bagian bawah yang ditandai dengan warna merah > *done > node region* dan pilih *slave master* pada bagian atas *area contact* yang ditandai dengan warna ungu > *done*.



**Gambar 4.16.** *Create interaction.*

- b. Kemudian akan muncul pilihan seperti Gambar 4.17.



**Gambar 4.17.** *Edit interaction dan contact property.*

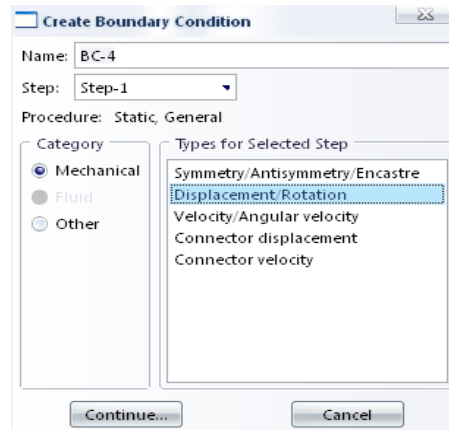
- c. Langkah selanjutnya adalah bagian *Edit Interaction > Finite Sliding > No adjustment > Create Contact Property > Contact > Continue*. Maka akan muncul pilihan *Edit Contact Property* seperti Gambar 4.20. Langkah selanjutnya *Mechanical > Normal Behavior > Use Augmented Lagrange > Mechanical > Tangential Behavior > penalty > Friction 0,6 > Ok*.

7. Menentukan kondisi batas dan pembebanan (*load*).

Selanjutnya menentukan kondisi batas pada permukaan bagian bawah dari *disc*, dimana saat *disc 1* dikenai beban maka nodal yang terdapat pada permukaan bagian bawah tidak dapat bergerak dalam arah *x*, *y* dan tidak dapat bergerak dalam arah *z*. Sedangkan nodal pada sumbu simetri dari *disc 1* dan *disc* tidak bisa bergerak dalam arah sumbu *z*.

Berikut ini langkah pemodelannya:

- a. Pada *Abaqus* pilih *Module* > *Load* > *Create Boundary Condition* > *Displacement / Rotation* > *Continue*.



**Gambar 4.18.** *Create boundary condition.*

Dari Gambar 4.20 > *Continue* > *Select Region for Boundary Condition* > agar pin hanya dapat bergerak searah sumbu y klik pada bagian pusat *disc 1* > klik *U1, U3, UR1, UR2 dan UR3 (all DOF)* > *Ok*.

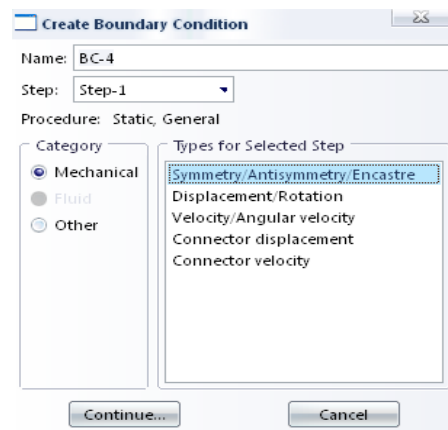


**Gambar 4.19.** *Menu boundary condition.*

- b. Membuat kondisi batas pada sumbu simetris *disc 1* agar tidak bergerak pada sumbu-z saat terjadinya pembebanan.

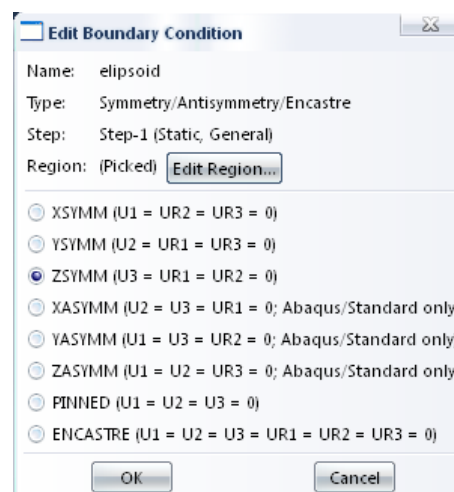
Berikut ini langkah pemodelannya:

Pada *Abaqus* pilih *Module > Load > Create Boundary Condition > Symetric/antisymetric > Continue*



**Gambar 4.20.** *Create baundary condition.*

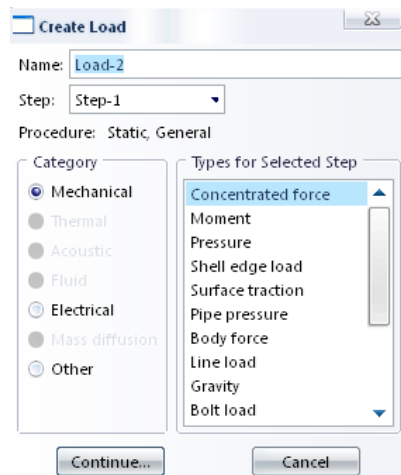
Dari Gambar 4.22 klik *Continue* > klik pada bagian simetris *disc 1* > klik ZSYMM > Ok.



**Gambar 4.21.** Pemilihan *line* pada *disc 1* untuk penentuan kondisi batas.

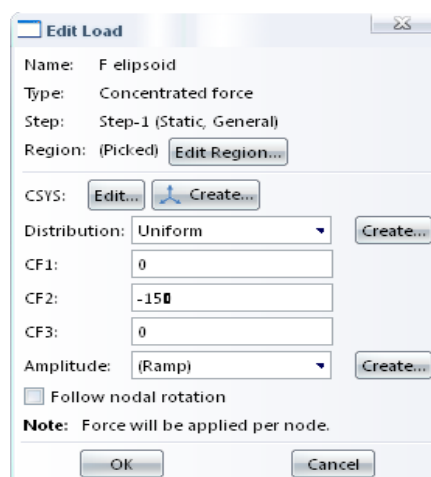
- c. Membuat *load/force* yang akan diberikan pada pemodelan. Langkah pemodelannya adalah sebagai berikut:

Pada *Abaqus* pilih *Module > Load > Create Load > Concentrated Force > Continue*.



**Gambar 4.22.** *Create load.*

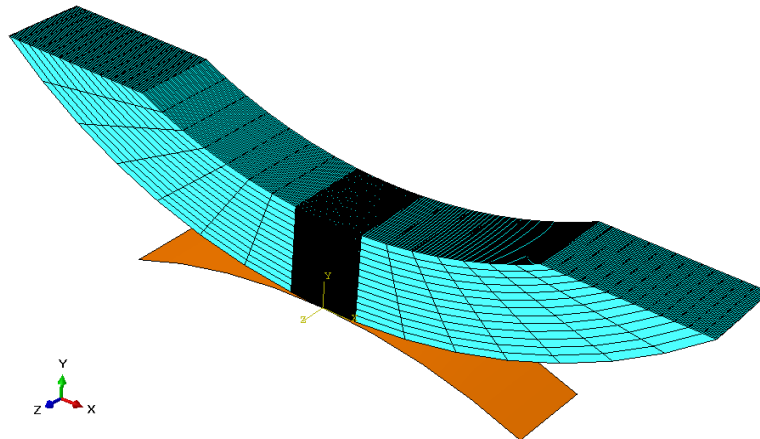
Dari Gambar 4.24 *Continue >* pilih titik penempatan *force* kemudian klik *>* isi table *CF2 (y)* load yang diketahui (beban bergerak kearah bawah searah sumbu-*y*) *> Ok*.



**Gambar 4.23.** Memasukkan data dan pemilihan titik untuk *load* yang diberikan pada *disc 1*.

8. Menentukan jenis elemen dan pembagian ukuran elemen (*mesh*).

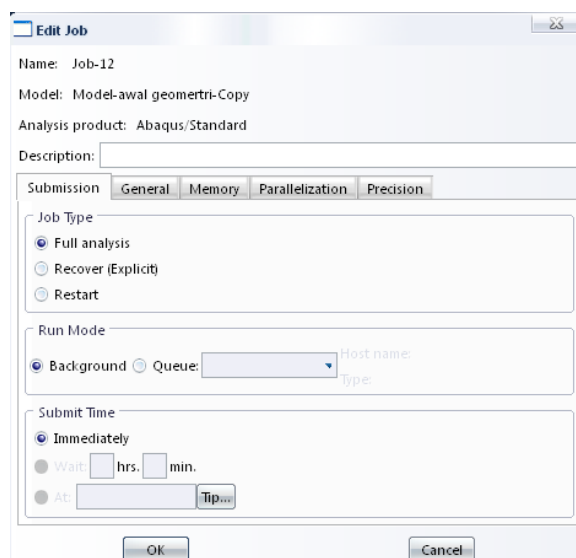
*Meshing* yang harus dicapai adalah seperti berikut:



**Gambar 4.24.** *Mesh.*

9. Penyelesaian (*job*).

*Job* adalah proses akhir dari pemecahan masalah pada pemodelan yang dibuat. Langkah pemodelan nya adalah sebagai berikut: Pada menu *Abaqus* pilih *Module > Job > Create Job > Continue > Full Analysis > Ok*.

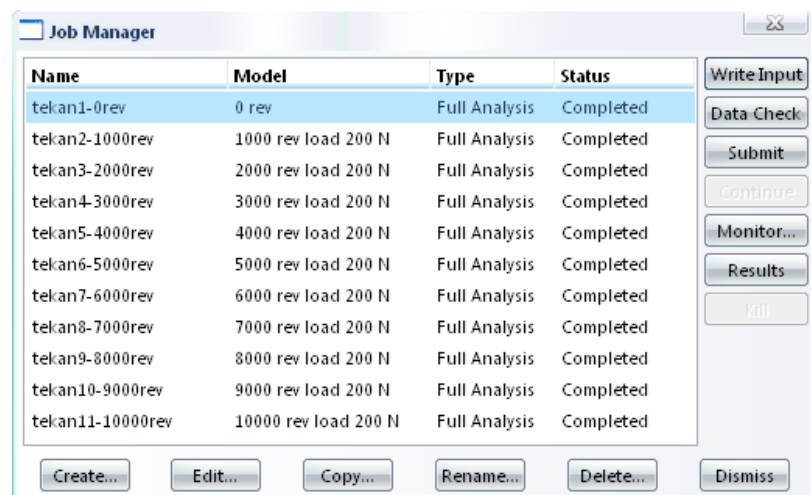


**Gambar 4.25.** *Create job.*

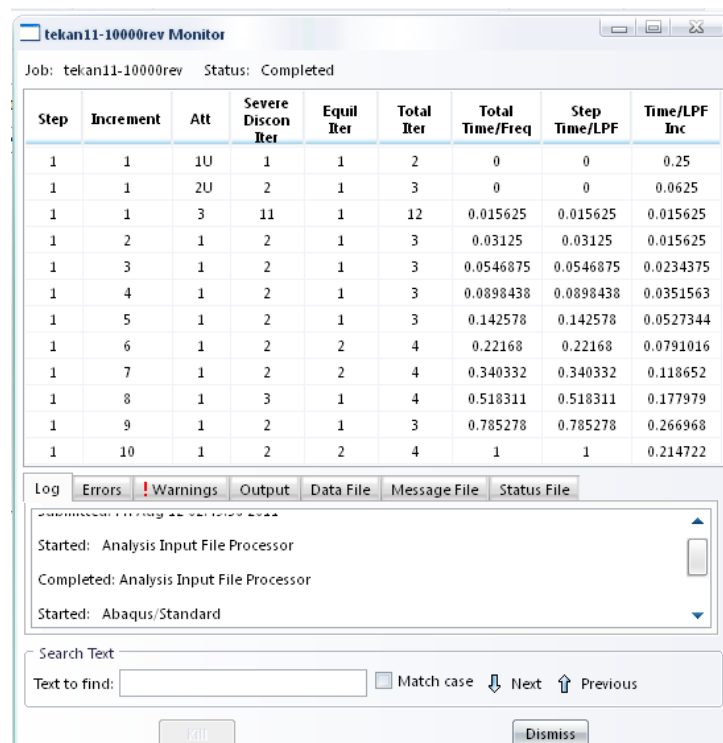


Setelah pembuatan *Job* selanjutnya ke proses *Running*. Langkah pemodelan nya adalah sebagai berikut:

Pada *Abaqus* pilih *Module* > *Job* > *Job Manager* > *Submit*



**Gambar 4.26.** *Job manager.*



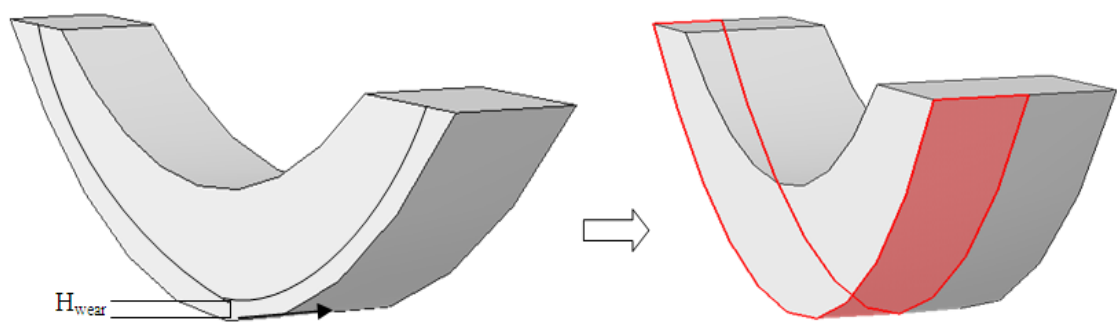
**Gambar 4.27.** *Proses running/iterasi.*

#### 4.7 Updated geometry

Kata kunci dari *updated geometry* adalah bagaimana kita merubah permukaan *disc* menjadi senyata mungkin dengan kondisi keausan yang sebenarnya. Cara yang dilakukan Hegadekatte adalah dengan menggeser tiap nodal dari permukaan *disc* sebesar nilai keausan yang telah dihitung sebelumnya. Namun penulis masih belum dapat mengikuti langkah-langkah yang dilakukan tersebut, penulis tidak menggeser tiap nodal tetapi penulis mencoba melakukan beberapa metode update geometry untuk menghasilkan nilai yang sama. Berikut adalah beberapa cara update geometry yang digunakan untuk mendekati grafik nilai keausan.

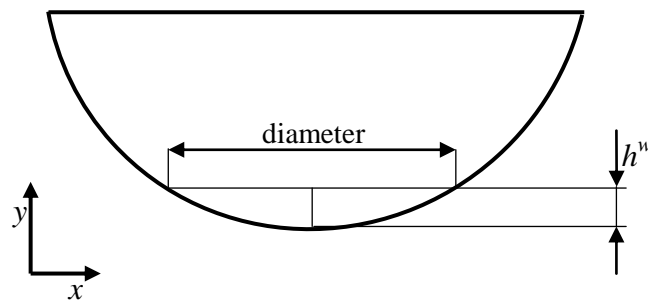
##### 4.7.1 Update geometry dipotong

Dengan melakukan *update geometri* seperti pada Gambar 4.7 maka bentuk geometri yang dihasilkan akan terbentuk seperti keausan yang sebenarnya. Karena benda tersebut sebagian geometrinya hilang karena pemotongan saat *update geometri*, maka untuk geometri terhadap sumbu x akan semakin kecil sedangkan terhadap sumbu z akan semakin besar, dan hal ini menyebabkan penurunan nilai tekanan kontak. Sehingga penulis melakukan tingkat increment yang tidak terlalu besar dengan tujuan tidak terjadi penurunan nilai tekanan kontak yang drastis.



**Gambar 4.28.** *Update geometri.*

Dapat kita simpulkan bahwa untuk mendapatkan grafik keausan yang tepat, kuncinya ada pada *contact area* yang harus kita bentuk saat langkah “*updated geometry*”. Maka dari itu kita perlu mempertimbangkan hubungan antara tinggi keausan yang terbentuk dengan bidang kontak yang terbentuk.



**Gambar 4.29.** Geometri juring.

Hal ini dapat kita dekati dengan mengasumsikan bahwa kenaikan nilai keausan sebanding dengan kenaikan bentuk kontak yang terjadi. Kita dapat menentukan *contact area* terhadap kenaikan keausan, dengan bantuan mengukur geometri juring, sehingga akan kita dapatkan nilai *contact area* disaat nilai keausan tertentu, seperti terlihat pada Gambar 4.8.

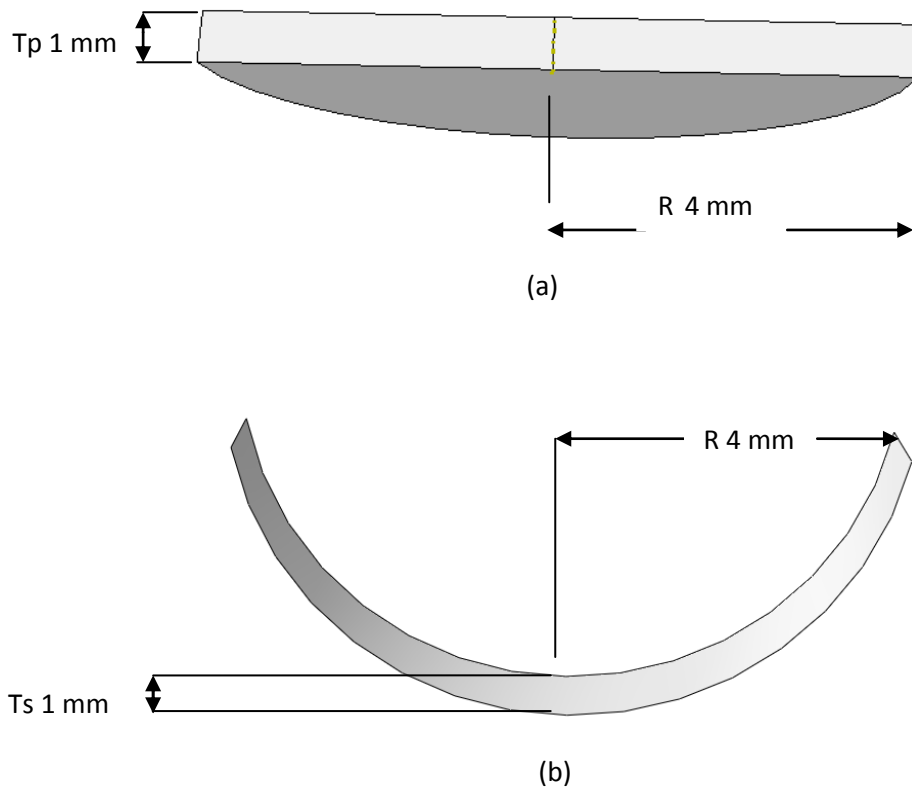
Nilai *contact area* tersebut kemudian dijadikan sebagai acuan *contact area* yang harus dicapai untuk setiap kenaikan keausan yang berbeda. Dengan cara ini maka akan kita dapatkan tekanan kontak rata-rata ( $p_m$ ) yang proporsional disetiap kenaikan keausan, sehingga grafik keausan terhadap jarak *sliding* akan mendekati benar.

#### 4.7.2 Update geometry dijepit

Pada sub-bab ini akan dijelaskan secara singkat bagaimana membuat update geometry menggunakan *software* ABAQUS 6.10-1.

1. Membuat bagian-bagian dari model (*part*)

Membuat model *disc 1* dan *disc 2* dengan geometri seperti pada gambar berikut.



**Gambar 4. 30.** Model geometry (a) disc 1 (b) penjepit.

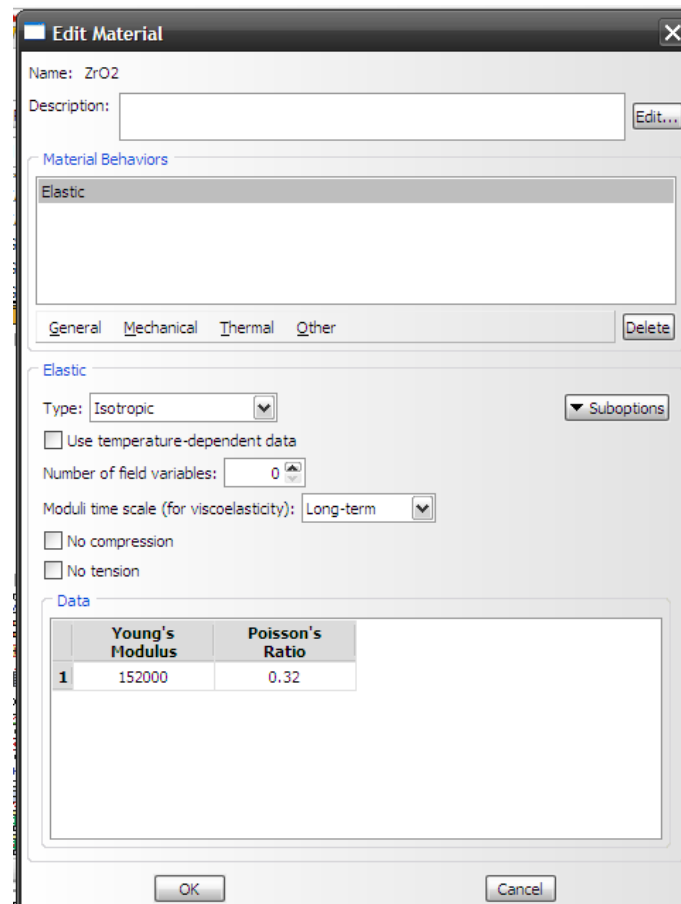
Untuk *disc 1* adalah sebuah bola yang dipotong menjadi seperempatnya dengan radius 4 mm sedangkan penjepit adalah sebuah *curveting* lingkaran dengan radius awal 4 mm yang kemudian radius tersebut akan berubah-ubah setelah dikurangi dengan keausannya.

2. Menentukan sifat material pada model (*property*).

a. Penentuan sifat material elastis.

Berikut ini adalah cara menentukan sifat material *elastic*:

Pada *Abaqus* pilih *Module* > *Property* > *Create Material* > *Mechanical* > *Elasticity* > *Elastic*.



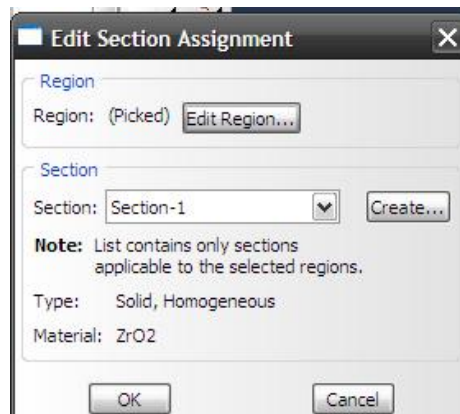
**Gambar 4.31.** Material elastis.

Dari Gambar 4.15 masukkan nilai *modulus young* sebesar 152000 MPa dan *Poisson's ratio* 0,32.

- b. Memasukkan sifat material ke dalam pemodelan.

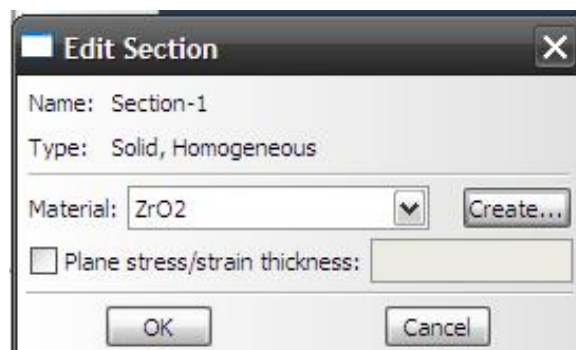
Setelah penentuan sifat material selesai, masukkan sifat material tersebut ke dalam model yang telah dibuat. Berikut ini adalah cara memasukkan sifat material ke dalam model.

- 5) Dari menu *Abaqus* pilih *Module > Property > Create Section > Category : Solid > Type : Homogeneous > Continue*.



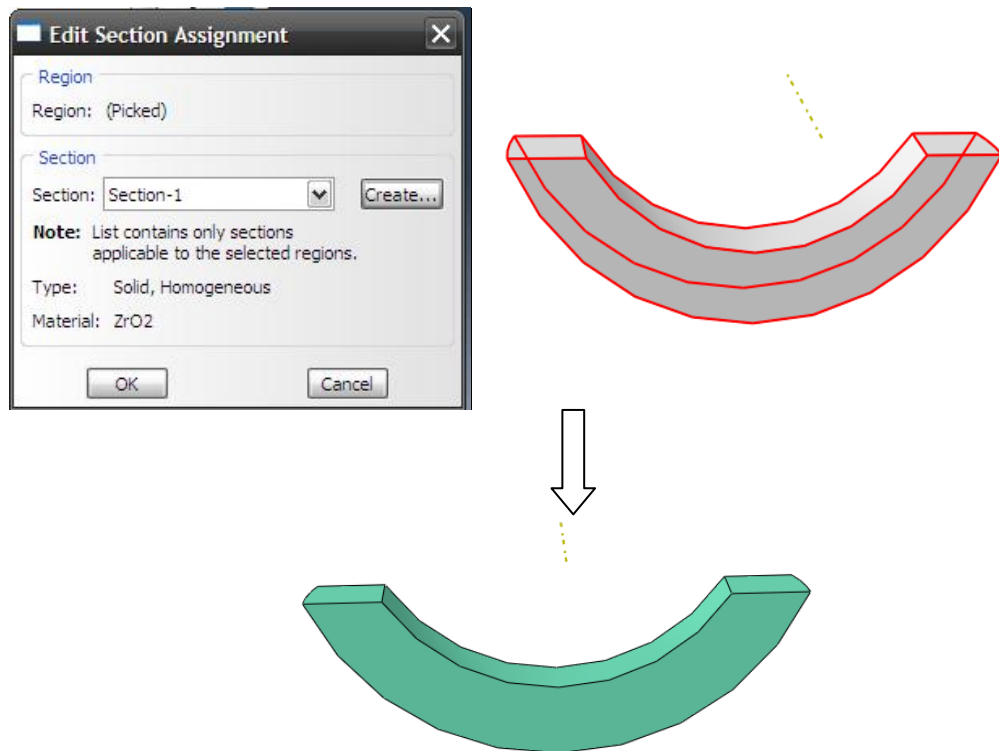
**Gambar 4.32.** *Create section.*

- 6) Setelah klik *continue* maka akan muncul pilihan *edit section* lanjutkan dengan klik *Ok*.



**Gambar 4.33.** *Edit section.*

- 7) Langkah selanjutnya adalah memasukkan *section* tersebut ke dalam pemodelan pada *part 1*. Dari *Module Abaqus > Property > Assign Section > blok pada model > Edit Section Assignment > Ok*.

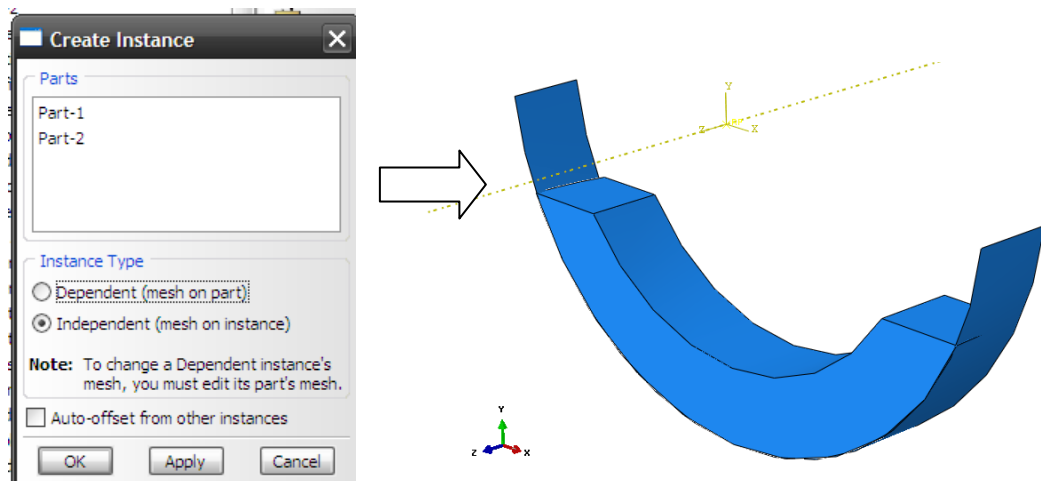


**Gambar 4.34.** *Section assignment part 1.*

- 8) Untuk part 2 karena pembuatannya di definisikan sebagai analytical rigid, maka kita tidak bisa memberikan sifat material karena sudah dikategorikan sebagai benda yang benar-benar rigid dan tidak akan mengalami deformasi.
3. Merakit bagian-bagian hingga menjadi model (*assembly*).

Karena pemodelan menggunakan dua buah *part* yaitu *part 1* dan *part 2* maka kedua *part* tersebut harus digabungkan menjadi satu kesatuan. Cara penggabungan yang dilakukan adalah dengan membuat titik reference point terletak ada sumbu pusat yang sama. Karena kedua part ini mempunyai perbedaan radius, maka akan terlihat bahwa part 2 akan memotong part 1 karena part 2 mempunyai radius yang lebih kecil. Berikut ini adalah cara menggabungkan (*assembly*) *part 1* dan *part 2*:

*Module > Assembly > Instan Part > Create Instan Part > Independent (mesh on instance) > Ok.*



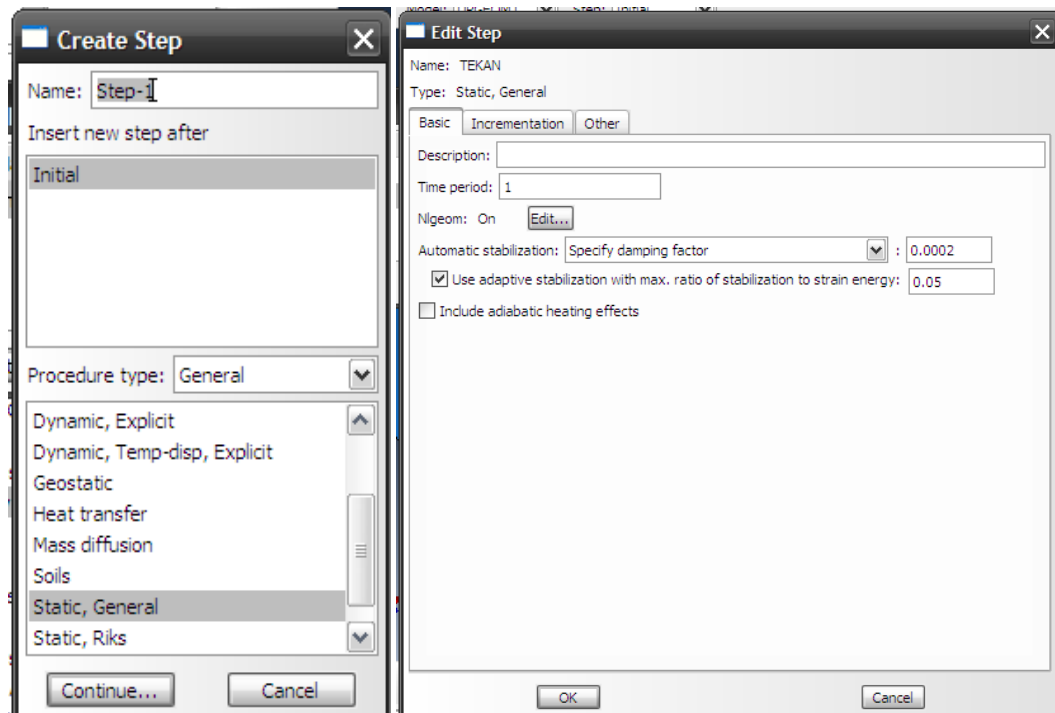
**Gambar 4.35.** *Assembly part 1 dan part 2.*

4. Menentukan jenis analisa dari FEM (*step*).

*Step* adalah langkah yang nantinya digunakan dalam proses simulasi *Abaqus*, *step* sendiri berfungsi untuk menentukan langkah – langkah analisa, menentukan *out put* yang diinginkan dan membatasi analisa sesuai dengan analisa yang dikehendaki. Berikut ini adalah cara untuk membuat *step* pada pemodelan. Dari *Module > Step > Create Step > Prosedure Type: General > Static General > Continue*.

*Basic > NLgeom on > pilih use stabilization dan include adiabatic heating effect. NLgeom dihidupkan sehingga posisi menjadi on.*





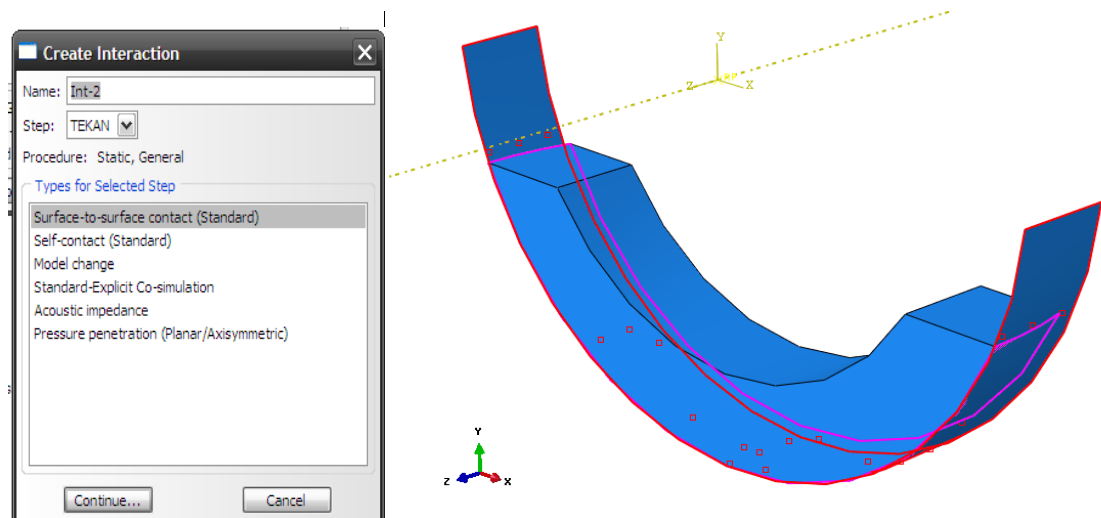
**Gambar 4.36.** *Create step.*

5. Menentukan pasangan kontak (*interaction*).

*Interaction* digunakan untuk membuat *contact*, seperti penentuan *master* dan *slave contact*, penentuan *contact properties*, dan interaksi mekanika.

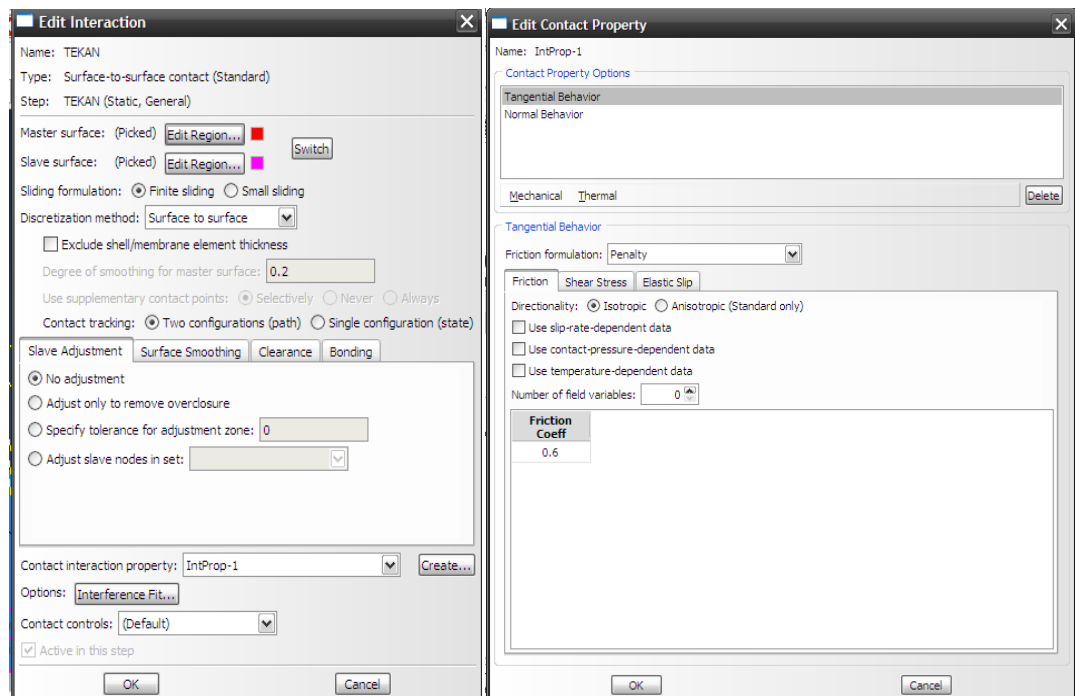
Berikut ini adalah cara membuat *interaction* pada permodelan:

- a. Pada Abaqus pilih *module > interaction > create Interaction > surface to surface contact > continue*. Selanjutnya pilih *master contact* pada *area contact* bagian bawah yang ditandai dengan warna coklat > *done > node region* dan pilih *slave master* pada bagian atas *area contact* yang ditandai dengan warna ungu > *done*.



**Gambar 4.37.** *Create interaction.*

Kemudian akan muncul pilihan seperti gambar 4.20.



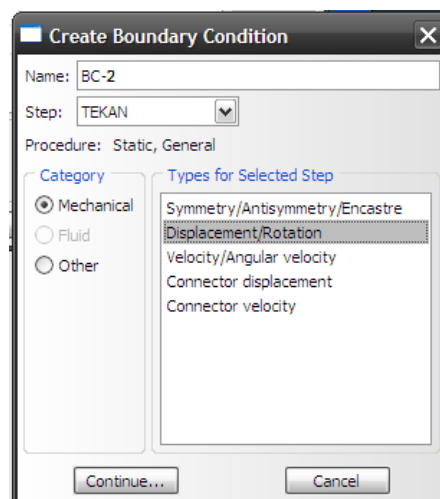
**Gambar 4.38.** *Edit interaction dan contact property.*

Langkah selanjutnya adalah bagian *Edit Interaction > Finite Sliding > No adjustment > Create Contact Property > Contact > Continue*. Maka akan muncul pilihan *Edit Contact Property* seperti Gambar 4.20. Langkah selanjutnya *Mechanical > Normal Behavior > Use Augmented Lagrange > Mechanical > Tangential Behavior > penalty > Friction 0,6 > Ok*.

6. Menentukan kondisi batas dan pembebanan (*load*).

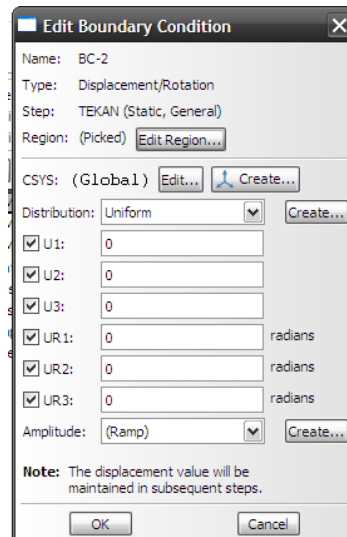
Selanjutnya menentukan kondisi batas pada permukaan bagian bawah dari *disc 1* dan *disc 2*. Dalam update geometry ini berbeda dengan pada waktu kita melakukan penekanan, kedua *disc* tersebut tidak dikenai beban tetapi masing-masing reference point dari kedua *disc* di setting untuk tetap pada arah x,y, dan z. Karena pada waktu assembly nya permukaan yang saling contact mempunyai perbedaan radius seolah-olah part 2 memotong part 1 tetapi dalam *software* ini akan secara otomatis bisa running sendiri dan akan membuat part 1 menjadi terdeformasi seolah-olah mengalami keausan. Berikut ini langkah pemodelannya:

- a. Pada *Abaqus* pilih *Module > Load > Create Boundary Condition > Displacement / Rotation > Continue*.



**Gambar 4.39.** *Create boundary condition.*

Dari Gambar 4.22 > *Continue* > *Select Region for Boundary Condition* > klik pada bagian bawah *disc 1* > klik *U1, U2, UR3 (all DOF)* > *Ok*.

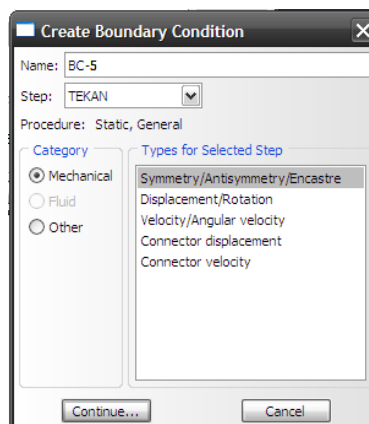


**Gambar 4.40.** Menu *boundary condition*.

- b. Membuat kondisi batas pada sumbu simetris *disc 1* agar tidak bergerak pada sumbu-*z* saat terjadinya pembebanan.

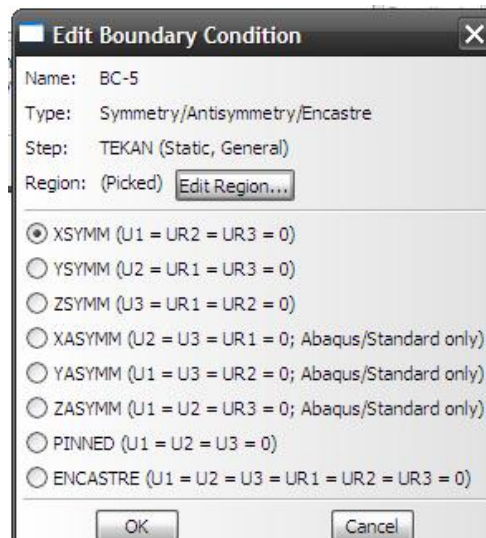
Berikut ini langkah pemodelannya:

Pada *Abaqus* pilih *Module* > *Load* > *Create Boundary Condition* > *Symetric/antisymetric* > *Continue*



**Gambar 4.41.** *Create baundary condition*.

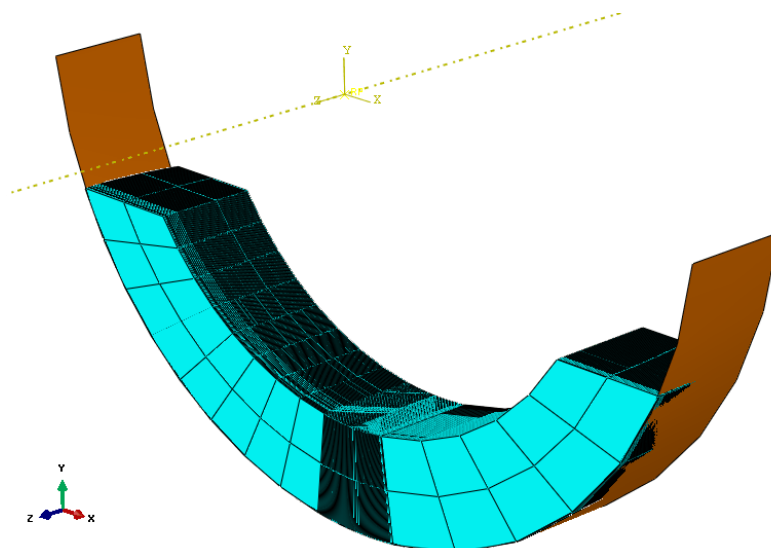
Dari Gambar 4.29 klik *Continue* > klik pada bagian simetris *disc 1* > klik XSYMM > Ok.



**Gambar 4.42.** Pemilihan *line* pada *disc 1* untuk penentuan kondisi batas.

7. Menentukan jenis elemen dan pembagian ukuran elemen (*mesh*).

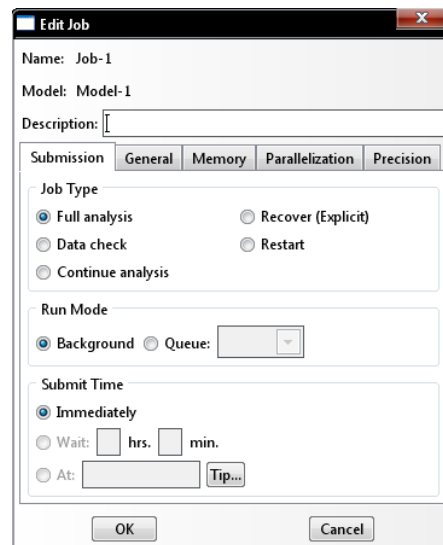
Meshing yang harus dicapai adalah seperti berikut:



**Gambar 4.43.** *Mesh*.

## 8. Penyelesaian (*job*).

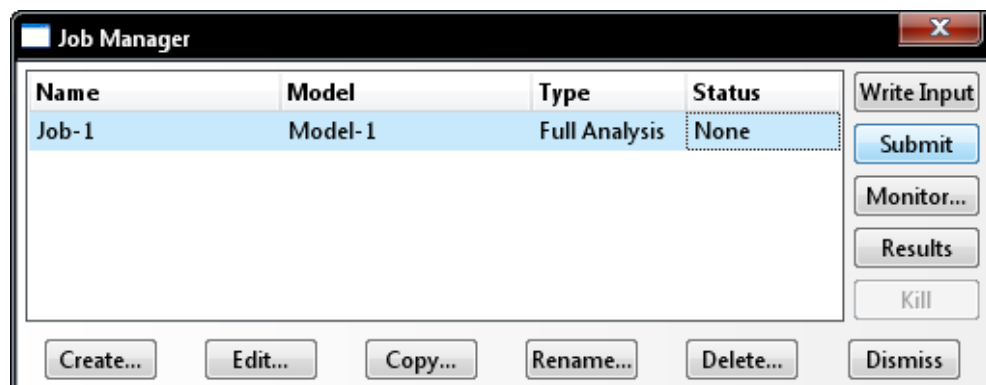
*Job* adalah proses akhir dari pemecahan masalah pada update geometry yang dibuat. Langkah pemodelan nya adalah sebagai berikut: Pada menu *Abaqus* pilih *Module > Job > Create Job > Continue > Full Analysis > Ok*.



**Gambar 4.44.** *Create job.*

Setelah pembuatan *Job* selanjutnya ke proses *Running*. Langkah pemodelan nya adalah sebagai berikut:

Pada *Abaqus* pilih *Module > Job > Job Manager > Submit*



**Gambar 4.45.** *Job manager.*

TEKAN1-16AGUSTUS2011-EXTRUDECEUT Monitor

Job: TEKAN1-16AGUSTUS2011-EXTRUDECEUT Status: Completed

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	1	1	12	2	14	0.0025	0.0025	0.0025
1	2	1	2	1	3	0.005	0.005	0.0025
1	3	1	1	2	3	0.00875	0.00875	0.00375
1	4	1	2	1	3	0.014375	0.014375	0.005625
1	5	1	2	1	3	0.0228125	0.0228125	0.0084375
1	6	1	2	1	3	0.0354687	0.0354687	0.0126563
1	7	1	1	2	3	0.0544531	0.0544531	0.0189844
1	8	1	2	1	3	0.0829297	0.0829297	0.0284766
1	9	1	3	0	3	0.125645	0.125645	0.0427148
1	10	1	2	1	3	0.189717	0.189717	0.0640723
1	11	1	2	1	3	0.285825	0.285825	0.0961084
1	12	1	2	1	3	0.429988	0.429988	0.144163
1	13	1	2	1	3	0.646232	0.646232	0.216244
1	14	1	3	0	3	0.970598	0.970598	0.324366
1	15	1	1	1	2	1	1	0.0294025

Log Errors !Warnings Output Data File Message File Status File

Submitted: Mon Aug 15 11:00:18 2011

Started: Analysis Input File Processor

Search Text

Text to find:  ☐ Match case

**Gambar 4.46.** Proses *running/iterasi*.

## BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan perhitungan keausan mengenai permasalahan *rolling sliding* menggunakan metode analitik dan metode elemen hingga pada bab sebelumnya, maka pada bab ini akan ditampilkan perbandingan hasil dari *journal* dengan hasil perhitungan ulang dari penulis untuk diverifikasi. Hasil-hasil yang akan ditampilkan diantaranya berupa gambar grafik keausan terhadap jumlah rotasi, grafik tegangan searah sumbu-y ( $\sigma_y$ ), grafik keausan searah sumbu-x ( $\sigma_x$ ), dan grafik tegangan terhadap jumlah rotasi.

### 5.1. Hasil metode analitik

Hal pertama yang kita lakukan dalam upaya menyelesaikan suatu permasalahan analisis adalah mencari suatu pembanding. Pembanding tersebut digunakan untuk melakukan suatu pengujian kelayakan hasil, yang berupa solusi analitis atau data bersifat percobaan (*experimental*) untuk membandingkan hasil-hasilnya.

Pada sub-bab ini penulis melakukan perhitungan ulang menggunakan metode perhitungan yang telah dibahas pada Bab IV, kemudian hasil perhitungan tersebut dibandingkan dengan hasil yang telah ada dalam literatur untuk diverifikasi.

Dari hasil verifikasi tersebut, maka akan diketahui perhitungan ulang yang telah dilakukan oleh penulis telah memenuhi syarat atau tidak. Dikatakan telah memenuhi syarat jika hasilnya sudah mendekati dengan hasil perhitungan yang telah ada di beberapa journal yang dijadikan acuan.

Verifikasi yang dilakukan adalah simulasi *FEM* yang telah dilakukan oleh Kanavalli untuk menganalisa keausan yang terjadi pada *twin-disc*. Gambar 5.1 menunjukkan simulasi keausan *twin-disc* pada eksperimen *FEM* oleh Kanavalli dengan beban 300 N.

### 5.2. Hasil simulasi menggunakan FEM

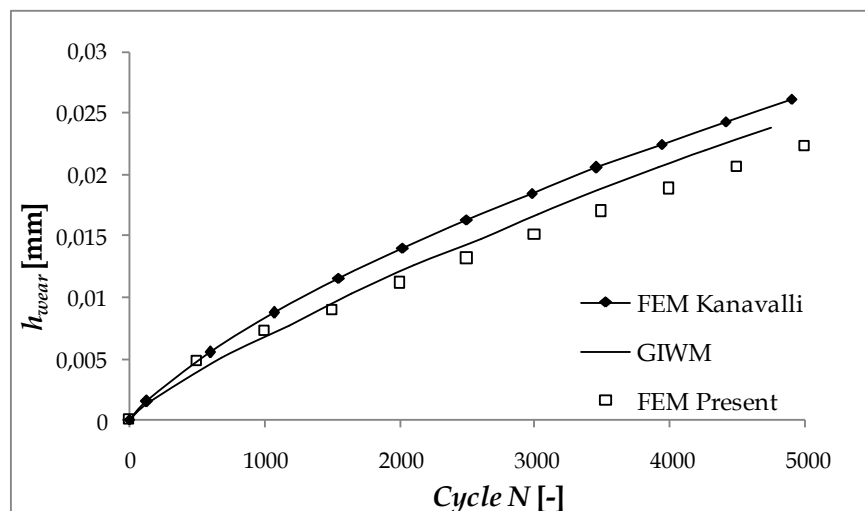
Dalam melakukan analisa FEM penulis mencoba melakukan beberapa cara untuk cara *update geometry*. Karena *update geometry* ini merupakan salah satu faktor



yang menentukan hasil dari luas dari kontak area dengan tekanan kontak. Cara yang penulis kerjakan dalam update geometry ada 2 cara, yaitu :

1. Metode yang pertama yaitu *update* dengan memotong part sesuai dengan tinggi keausannya, cara ini telah diverifikasi oleh teman saya dan medapat kan hasil yang bagus dalam verifikasi jurnalnya. Tetapi pada waktu penulis menggunakan cara ini kurang maksimal karena cara ini mengakibatkan penurunan luas area kontak dan penurunan tekanan kontak yang besar jadi grafik yang dihasilkan langsung mengalami penurunan.
2. Metode yang kedua adalah dengan cara *disc* yang mengalami keausan dijepit untuk menghasilkan luas area kontak yang sesuai dengan hitungan analitik. Metode ini menghasilkan penurunan luas area kontak dan penurunan tekanan kontak yang mengalami penurun yang kecil.

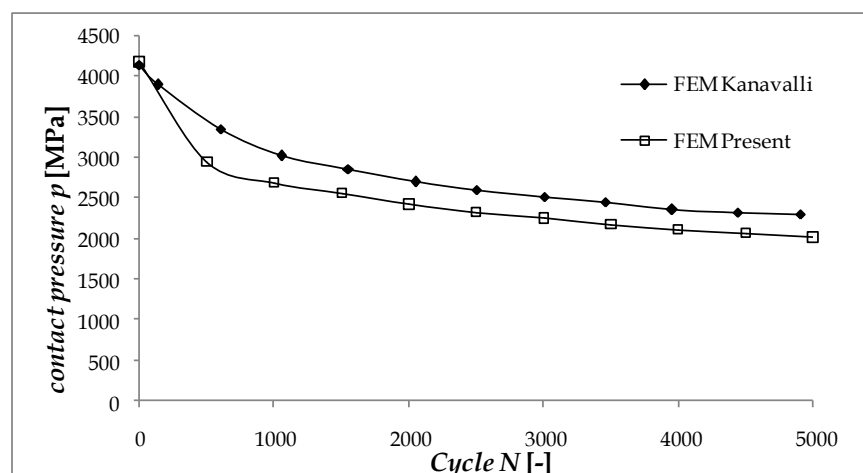
#### 5.2.1. Verifikasi terhadap hasil perhitungan metode GIWM, FEM Kanavalli, dan FEM Present untuk *load* 300 N dan *slip* 10% dengan *update geometry* dipotong



**Gambar 5.1.** Grafik tinggi keausan terhadap jumlah rotasi dengan beban  $F_N = 300$  N dengan *slip* 10%.

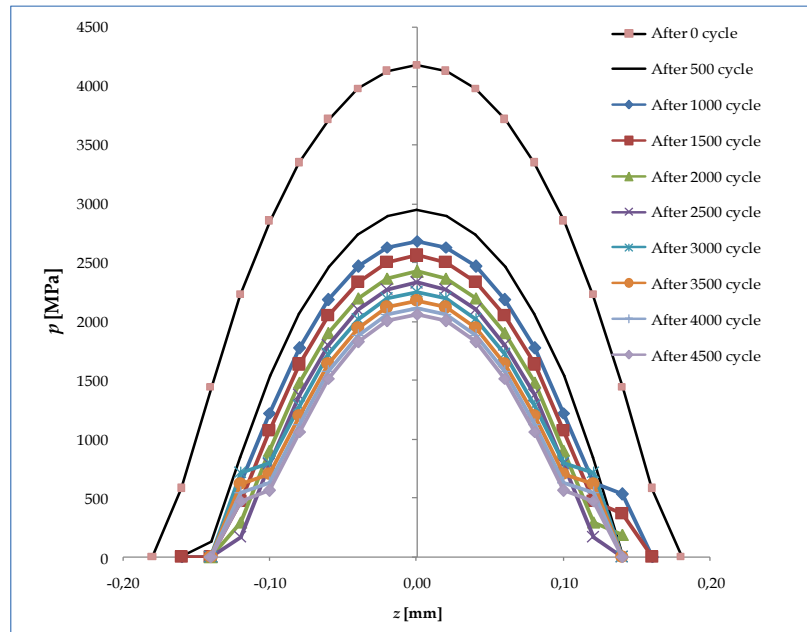
Gambar 5.1 adalah grafik tinggi keausan terhadap jumlah rotasi menggunakan FEM dengan beban 300 N dan slip sebesar 10%. Grafik tersebut terdiri dari hasil perhitungan GIWM, FEM Kanavalli dan hasil perhitungan ulang oleh penulis, kemudian hasil-hasil tersebut diverifikasi dan hasilnya sebagai berikut :

1. Perbandingan hasil antara *GIWM* dengan *FEM* Kanavalli terdapat perbedaan rata-rata sekitar 10,25 %. Perbedaan ini mungkin dikarenakan adanya suatu perbedaan cara mendapatkan panjang kontak yang terbentuk antara hitungan analitik *GIWM* dengan hasil simulasi *FEM* .
2. Perbandingan hasil antara *FEM* Kanavalli dengan *FEM Present* yang dikerjakan oleh penulis terdapat perbedaan rata-rata sekitar 10,41 %. Penulis berpendapat bahwa perbedaan ini karena cara *update geometry* yang dilakukan berbeda sehingga luasan kontak yang terbentuk tidak sama dan tekanan kontak yang dihasilkan juga berbeda.
3. Perbandingan antara *GIWM* dengan *FEM present* terdapat perbedaan rata-rata sekitar 1.24%. Penulis berpendapat bahwa perbedaan ini karena dalam *GIWM* yang digunakan adalah keausan secara global dan penulis menggunakan *update geometry* untuk mendekati nilai keausan yang sebenarnya dan menghasilkan nilai yang berbeda.

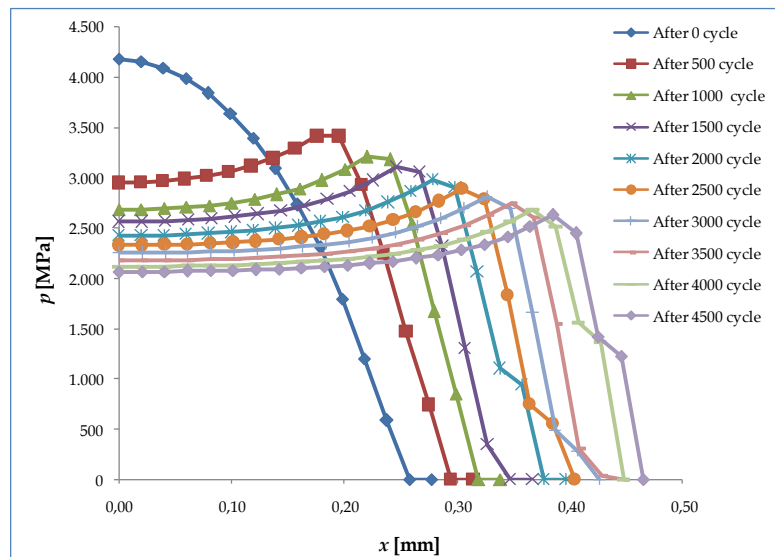


**Gambar 5.2.** Grafik tekanan kontak terhadap jumlah rotasi dengan beban  $F_N = 300$  N dengan *slip* 10%.

Gambar 5.2 adalah grafik tekanan kontak terhadap jumlah rotasi dari FEM Kanavalli dengan FEM yang dikerjakan penulis masih mempunyai perbedaan rata-rata sekitar 10,87 %. Perbedaan dikarenakan karena luasan kontak yang terbentuk berbeda tidak tepat sesuai kenyataannya, maka tekanan kontak yang terjadi pun akan berbeda.



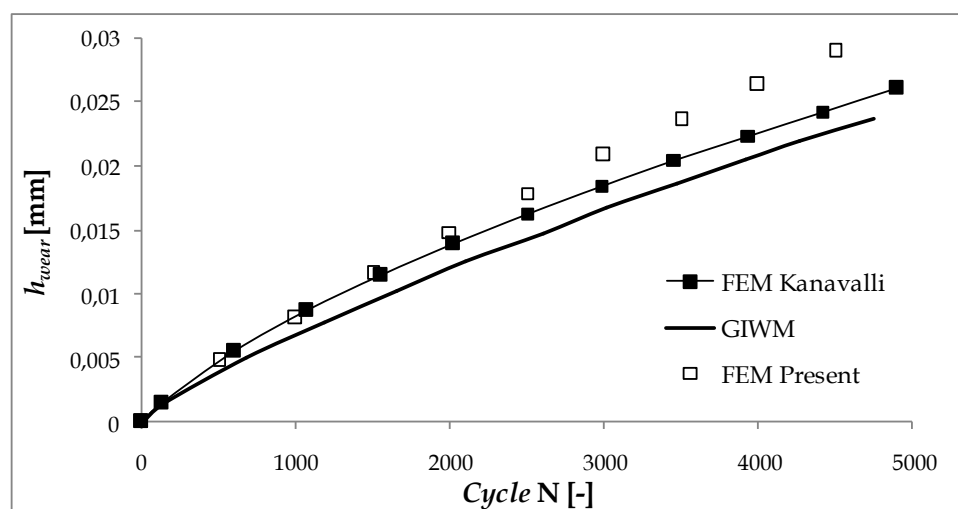
**Gambar 5.3.** Grafik tekanan kontak searah sumbu- $z$  ( $\sigma_z$ ), *slip* 10% dan *load* 300 N.



**Gambar 5.4.** Grafik tekanan kontak searah sumbu- $x$  ( $\sigma_x$ ) *slip* 10% dan *load* 300 N.

Dapat dilihat pada gambar 5.3 terlihat bahwa grafik makin mengecil untuk sumbu-x seiring dengan bertambahnya jumlah rotasi, hal ini karena radius pada benda terjadi pengurangan karena adanya ketinggian aus, sedangkan untuk Gambar 5.4 luas kontak semakin panjang karena kontak yang terjadi membentuk kontur sebuah ellips.

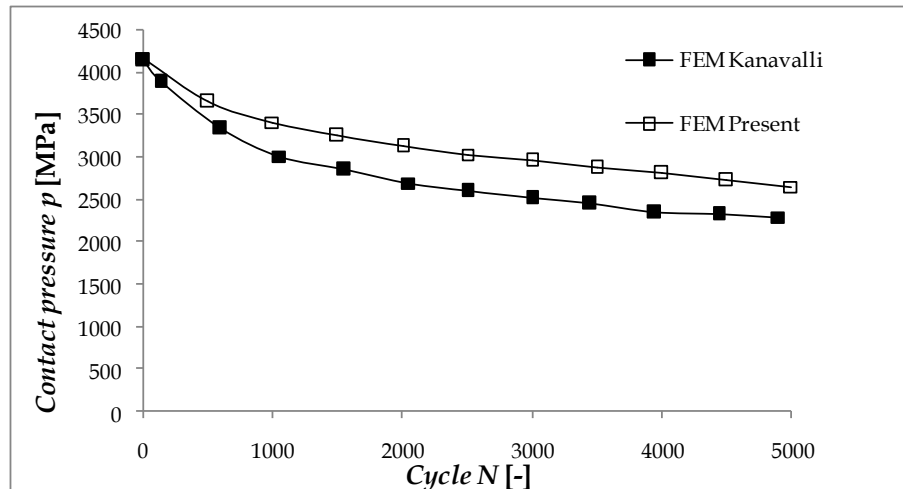
### 5.2.2. Verifikasi terhadap hasil perhitungan metode GIWM, Kanavalli, dan FEM untuk *load* 300 N dan *slip* 10% dengan *update geometry* dijepit.



**Gambar 5.5.** Grafik tinggi keausan terhadap jumlah rotasi dengan beban  $F_N = 300$  N dengan *slip* 10%.

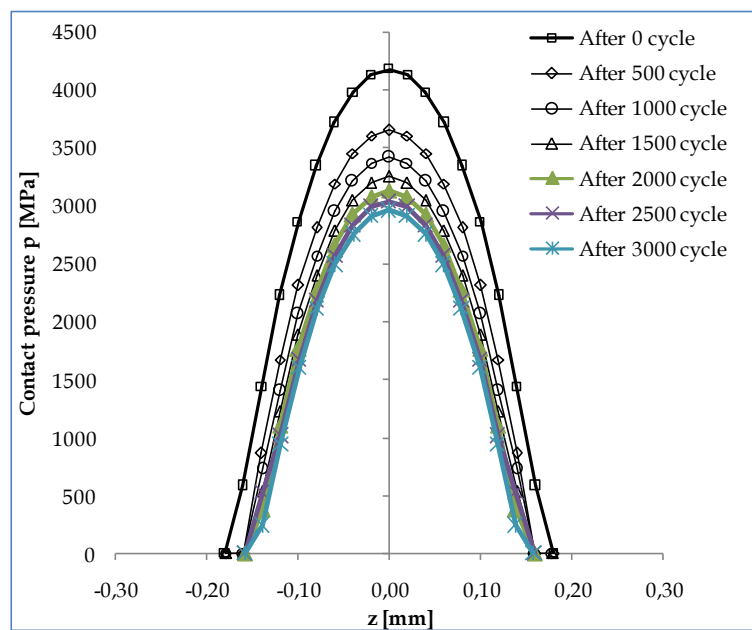
Gambar 5.5 adalah grafik tinggi keausan terhadap jumlah rotasi menggunakan FEM dengan beban 300 N dan slip sebesar 10%. Grafik tersebut terdiri dari hasil perhitungan GIWM, FEM Kanavalli dan hasil perhitungan ulang oleh penulis, kemudian hasil-hasil tersebut diverifikasi dan hasilnya sebagai berikut:

Perbandingan hasil antara *FEM Kanavalli* dengan *FEM present* yang dikerjakan oleh penulis terdapat perbedaan rata-rata sekitar 20,13%. Penulis memperkirakan perbedaan ini karena cara *update geometry* yang dilakukan berbeda sehingga luasan kontak yang terbentuk tidak sama dan tekanan kontak yang dihasilkan juga berbeda.

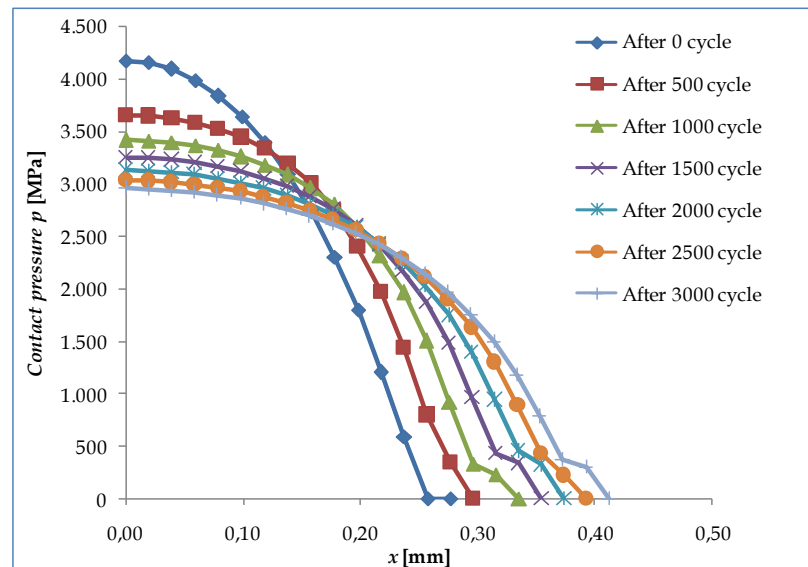


**Gambar 5.6.** Grafik tekanan kontak terhadap jumlah rotasi dengan beban  $F_N = 300$  N dengan *slip* 10%.

Gambar 5.6 adalah grafik tekanan kontak terhadap jumlah rotasi dari FEM Kanavalli dengan FEM yang dikerjakan penulis masih mempunyai perbedaan rata-rata sekitar 12 %. Perbedaan dikarenakan karena luasan kontak yang terbentuk berbeda tidak tepat sesuai kenyataannya, maka tekanan kontak yang terjadi pun akan berbeda.



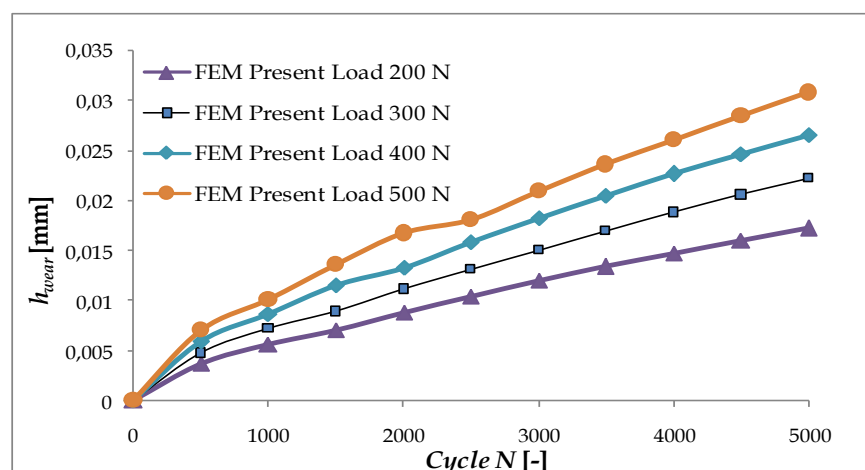
**Gambar 5.7.** Grafik tekanan kontak searah sumbu- $z$  ( $\sigma_z$ ), *slip* 10% dan *load* 300 N.



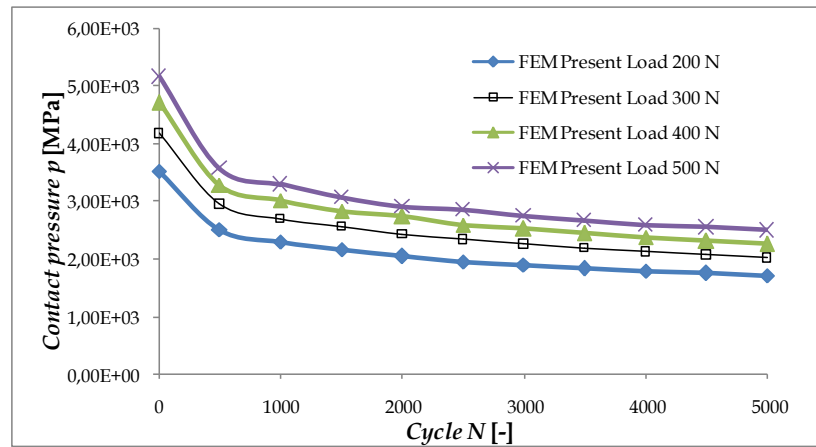
**Gambar 5.8.** Grafik tekanan kontak searah sumbu- $x$  ( $\sigma_x$ ) *slip* 10% dan *load* 300 N.

Dapat dilihat pada gambar 5.7 terlihat bahwa grafik makin mengecil untuk sumbu- $x$  seiring dengan bertambahnya jumlah rotasi, hal ini karena radius pada benda terjadi pengurangan karena adanya ketinggian aus, sedangkan untuk Gambar 5.8 luas kontak semakin panjang karena kontak yang terjadi membentuk kontur sebuah ellips.

### 5.2.3. Prediksi keausan *FEM* untuk *load* 200 N, 300 N, 400 N, 500 N dengan *slip* 10%.



**Gambar 5.9.** Grafik tinggi keausan ( $h^{wear}$ ) terhadap jumlah rotasi ( $N$ ), *load* 200 N, 300 N, 400 N dan 500 N (*slip* 10%).



**Gambar 5.11.** Grafik  $P$  center terhadap jumlah rotasi ( $N$ ), untuk  $load$  200 N, 300 N, 400 N dan 500 N ( $slip$  10%).

Dari hasil yang telah diperoleh penulis tersebut penulis dapat menyimpulkan bahwa dalam memprediksi tinggi keausan dalam menggunakan *FEM* yaitu dalam *update geometri*, karena ketika perhitungan analitik dilakukan dengan *update geometri* yang tidak benar maka hasil tinggi keausan tidak akan valid.

Dalam melakukan perhitungan tinggi keausan diharapkan terdapat verifikasi dengan hasil eksperimen dari para peneliti keausan sehingga kita dapat mempunyai perhitungan yang dapat diakui tingkat kedekatan yang sebenarnya, karena dalam melakukan simulasi dengan menggunakan software yang berkaitan dengan *finite element method* ketika dilakukan simulasi dengan memasukan parameter apapun akan mendapatkan hasilnya. Karena itu diperlukan verifikasi untuk membandingkannya.

*Update geometri* yang dilakukan oleh beberapa peneliti keausan memiliki cara yang berbeda namun dalam *update geometri* tetap membuat bentuk geometri benda sesuai dengan bentuk keausan yang menyerupai bentuk keausan yang sebenarnya.

## BAB VI

### PENUTUP

#### 6.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari Tugas Akhir ini adalah:

1. Verifikasi hasil pada beban 300 N, *slip* 10% saat mencapai 5000 *cycle*.
  - a) Perbandingan *GIWM* Hegadekatte dengan *FEM* Kanavalli terdapat perbedaan rata-rata sekitar 10,23%.
  - b) Perbandingan antara *FEM* Kanavalli dengan *FEM present* terdapat perbedaan rata-rata sekitar 10,41% .
  - c) Perbandingan antara *GIWM* dengan *FEM present* terdapat perbedaan rata-rata sekitar 1,24%.
2. Pebandingan Verifikasi beban 3000 N menggunakan *update geometry* dijepit
  - a) Perbandingan antara *FEM* Kanavalli dengan *FEM present* terdapat perbedaan rata-rata sekitar 20,13%.
  - b) Perbandingan antara *GIWM* dengan *FEM present* terdapat perbedaan rata-rata sekitar 32,42%.
3. Prediksi hasil perhitungan keausan FEM load 200 N, 400 N dan 500 N saat mencapai 5000 *cycle*.
  - a) Prediksi hasil keausan FEM, load 200 N mencapai ketinggian keausan 0.017 mm.
  - b) Prediksi hasil keausan FEM, load 400 N mencapai ketinggian keausan 0.027 mm.
  - c) Prediksi hasil keausan FEM, load 500 N mencapai ketinggian keausan 0.031 mm.

#### 6.2 Saran

1. Hal yang masih menjadi kendala dalam Tugas Akhir ini adalah dalam perhitungan metode elemen hingga, yaitu pada langkah “*update geometry*”, perlu dilakukan penyempurnaan sehingga didapatkan hasil yang tepat, khususnya untuk menganalisa lebih lanjut adanya lonjakan tekanan kontak di bagian sisi dari geometri *disc* yang telah dilakukan “*update geometry*”.



2. Menentukan jumlah elemen dan nodal harus diperhatikan karena jarak tiap nodal yang terlalu halus atau kasar akan mempengaruhi nilai tekanan kontak yang akan dipergunakan dalam perhitungan analitik. Sehingga untuk mendapatkan jumlah elemen dan node harus di sesuaikan dengan teori Hertz.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] <http://www.klikunic.com/2010/04/kereta-api-bergigi-hanya-di-indonesia.html> & <http://yefrichan.wordpress.com/category/elemen-mesin/page/5.html> (28 Oktober 2011).
- [2] Jamari, J. (2006). *Running-in of Rolling Contacts*. PhD Thesis, University of Twente, Zutphen, The Netherlands.
- [3] Almen, J.O. (1950). in *Mechanical Wear* (ed J.T. Burwell), American Society for Metals, pp. 229–288.
- [4] Glossary of terms and definitions in the field of friction, wear and lubrication, Research Group on Wear of Engineering Materials, Organisation for Economic Co-operation and Development, (1969). Reprinted in *Wear Control Handbook* (eds M.B. Peterson and W.O. Winer), American Society of Mechanical Engineers, 1980, pp. 1143–1303.
- [5] Zum Gahr, K.H. (1987). ‘*Microstructure and Wear of Materials*’, Tribology Series, Elsevier, Amsterdam, pp. 132–148.
- [6] Hokkirigawa, K. and Kato, K. (1989). ‘*Theoretical Estimation of Abrasive Wear Resistance Based on Microscopic Wear Mechanism*’, *Wear of Materials* (ed K.C. Ludema), ASME, New York, pp. 1–8.
- [7] Stachowiak, G.W. (2005). *Wear–Materials, Mechanisms And Practice*. John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, England.
- [8] Buckley, D.H. (1981). *Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication*. Elsevier, Amsterdam.
- [9] Kimura, Y. (1983). *Mechanisms of wear–the Present State of Our Understanding*, Transactions JSLE, Vol.28, pp. 709-714.
- [10] Blau, P. J. (2001). *The significance and the use of friction coefficient*. Tribology International, 34, 585-591.
- [11] Liu, R. & Li, D. Y. (2001). *Modification of archard's equation by taking account of elastic/pseudoelastic properties of materials*. Wear, 251, 956-964.
- [12] <http://redyfirmansyah.blogspot.com> [20 Oktober 2011].

- [13] Stolarski, TA, Tobe, S, “*Rolling Contacts*”, Professional Engineering Publishing Limited London and Bury St. Edmunds, UK (2000).
- [14] Anderson, S. (2006) *Wear Simulation*. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.
- [15] Archard, J. F. (1953). *Contact and rubbing of flat surfaces*. J. Appl. Phys., 24, 981-988.
- [16] Holm R. (1946). *Electric contacts*. Uppsala: Almqvist and Wiksells Boktryckeri AB.
- [17] Sarkar, A. D. (1980). *Friction and wear*. Academic Press, London.
- [18] Podra, P. & Andersson, S. (1999). *Simulating sliding wear with finite element method*. Tribol. Int., 32, 71-81.
- [19] Hegadekatte, V, dkk. (2008). *A predictive modeling scheme for wear in tribometers*. Elsevier. Amsterdam.
- [20] Kanavalli, B. (2006). “*Aplication of User Defined Subroutine UMESMOTION in ABAQUS for Simulating Dry Rolling/Sliding Wear*”, PhD Thesis, Royal Institute of Technology (KTH)
- [21] Abascal, R., Rodríguez- Tembleque, L. (2010). *A boundary element formulation for wear modeling on 3D contact and rolling-contact problems*. Elsevier, Amsterdam.
- [22] <http://atlas.cc.itu.edu.tr/mecit/um508e/Liu-pdf>. (28 September 2011).
- [23] Sonief, A.A. (2003). Diktat Metode Elemen Hingga. Fakultas Teknik-Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya, Malang.
- [24] ABAQUS. (2004). V 6.5-1. Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc., Providence, RI, USA.

## LAMPIRAN

- Journal International berjudul *A predictive modeling scheme for wear in tribometers*, oleh V.Hegadekatte, S. Kurzenhauser, N Huber dan O. Kraft.